



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**

---

**SECRETARÍA ACADÉMICA  
DOCTORADO EN EDUCACIÓN**

**ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE  
ENTROPÍA. REPRESENTACIONES E IMPLICACIONES  
PARA LA ENSEÑANZA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN EDUCACIÓN**

**P R E S E N T A  
NORMA YOLANDA ULLOA LUGO**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. FERNANDO FLORES CAMACHO**

**MÉXICO, D. F.**

**SEPTIEMBRE DEL 2006**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**

---

**SECRETARÍA ACADÉMICA  
DOCTORADO EN EDUCACIÓN**

**ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE  
ENTROPÍA. REPRESENTACIONES E IMPLICACIONES  
PARA LA ENSEÑANZA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN EDUCACIÓN**

**P R E S E N T A**

**NORMA YOLANDA ULLOA LUGO**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. FERNANDO FLORES CAMACHO**

**COMITÉ TUTORAL: DR. ÁNGEL D. LÓPEZ Y MOTA  
DR. PLINIO SOSA FERNÁNDEZ**

**MÉXICO, D. F.**

**SEPTIEMBRE DEL 2006**

**A Rafael, mi amigo, mentor y compañero de vida con todo mi amor, por su paciencia y permanente apoyo. Este doctorado es tan mío como suyo.**

**A mis amadas hijas Norma y Marisa, mi mayor orgullo. Para ellas, que se encuentran construyendo futuros, con el deseo de que la obtención de este grado contribuya a orientar su vida hacia metas de continua superación personal y profesional, y a recordar que la felicidad no está tanto en la satisfacción del logro sino en el esfuerzo cotidiano y gozoso del proceso.**

**A la memoria de mis padres**

**A mis hermanos, mi amorosa coraza protectora, mujeres y hombres íntegros.**

**Especialmente a**

**Olga. Alegría de vivir, un ejemplo para todos y siempre con una meta por alcanzar.**

**Julio. Estudioso de la historia, siempre animoso, siempre cercano.**

**Pedro. Practicante analítico y apasionado de la política. Presencia, fuerte, triunfante.**

**Irma. Una canción en el corazón, en su vida y en la nuestra.**

**Sergio. El médico y el investigador. Una feliz combinación en una vida plena de logros.**

**Oscar. La solidez y dureza de la ingeniería suavizada por el piano, guitarra y bohemia.**

**A Ivabelle y a Susana aunque lejos cerca.**

**Al Dr. Fernando Flores Camacho, mi Director de tesis, que me abrió las puertas del CCADET y con su ejemplo me enseñó a apreciar la singular alegría de vivir en un entorno dedicado a la investigación. Por sus enseñanzas y su confianza, mi agradecimiento respeto, y admiración.**

**Al Dr. Ángel D. López y Mota y al Dr. Plinio Sosa Fernández miembros de mi Comité Tutorial quienes me acompañaron acuciosa y desinteresadamente durante todo el trayecto. Gracias por su ejemplo.**

**A los Lectores-Revisores de tesis y miembros del Jurado:**

**Dr. Jorge Barojas Weber**

**Dra. Mercè Izquierdo Aymerich**

**Dr. Luis Miguel Trejo Candelas**

**Dr. Cesar Eduardo Mora Ley**

**que con sus atinadas observaciones permitieron mejorar este trabajo.**

**A los compañeros del CCADET y de la ADP-CIMIE. Siempre amigos solidarios.**

**A la FES Iztacala y la UNAM mi pasión y vida de trabajo.**

**A la Universidad Pedagógica, mi nueva *Alma Mater***

# INDICE

<b>Presentacion</b>	<b>i</b>
<b>Capítulo 1. Problema, instrumentos analíticos y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problema de investigación</b>	<b>1</b>
1.1.1 Construcción del problema	1
1.1.2. Vertiente histórica	5
1.1.3 Vertiente educativa	6
<b>1.2 La evolución histórica de la entropía. Representaciones e implicaciones para la enseñanza. Instrumentos analíticos</b>	<b>8</b>
1.2.1 Para el análisis histórico-filosófico	9
1.2.1.1 Constructores. Continuadores. Difusores	9
1.2.1.2 Marco filosófico	10
1.2.1.3 Enfoque lógico-empirista	11
1.2.1.4 Nueva filosofía de la ciencia	16
1.2.1.4.1 Percepción significada y otras nociones teóricas	20
1.2.1.4.2 Significación conceptual y significación perceptual. Diferencias	24
1.2.2 Para las implicaciones educativas	27
1.2.2.1 Difusores: autores de libros de texto y profesores	29
1.2.2.2 Marco constructivista	30
1.2.2.3 Dimensiones histórica, epistemológica y de enseñanza	34
1.2.2.4 Perfil epistemológico y matriz disciplinaria	34
<b>1.3 Objetivos y planteamiento de la investigación</b>	<b>35</b>
<b>VERTIENTE HISTÓRICA. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA</b>	<b>38</b>
<b>Capítulo 2. Origen y desarrollo del concepto de entropía. Los constructores. Los continuadores</b>	<b>38</b>
<b>2.1 Los constructores: Clausius</b>	<b>38</b>
2.1.1 Memoria IX de Clausius (1865). Presentación del concepto de entropía	47
2.1.1.1 El sentido físico-disciplinario construido por Clausius	49
<b>2.2 Los Constructores: Boltzmann</b>	<b>51</b>
2.2.1 Vacío conceptual y problema	54
2.2.2 La inconmensurabilidad con Boltzmann	56
2.2.2.1 Cambio en el método	56
2.2.2.2 Cambio en la entropía	60
<b>2.3 ¿Se da con Boltzmann un cambio de paradigma?</b>	<b>63</b>

<b>2.4 Los continuadores: Planck, Fermi, Sommerfeld, Schrödinger</b>	<b>68</b>
2.4.1 Max Planck	69
2.4.2 Enrico Fermi	71
2.4.3 Arnold Sommerfeld	74
2.4.4 Erwin Schrödinger	78
<b>2.5 Comentarios comparativos</b>	<b>83</b>
<b>2.6 Otros continuadores: Gibbs, Carathéodory</b>	<b>88</b>
2.6.1 Joshua Willard Gibbs	88
2.6.2 Constantin Carathéodory	90
<b>2.7 Comentarios y discusión</b>	<b>91</b>
<b>VERTIENTE EDUCATIVA. REPRESENTACIONES DE LA ENTROPÍA E IMPLICACIONES PARA SU ENSEÑANZA</b>	<b>94</b>
<b>Capítulo 3. Los difusores – autores de libros de texto. Definiciones y representaciones de la entropía</b>	<b>95</b>
<b>3.1 La muestra de los libros de texto</b>	<b>98</b>
<b>3.2 Propuesta de análisis</b>	<b>105</b>
3.2.1 Los libros de termodinámica	105
3.2.1.1 La entropía en los libros de texto	107
<b>3.3 La evolución del concepto de entropía</b>	<b>111</b>
3.3.1 En busca de la inteligibilidad de la entropía	113
3.3.1.1 Díaz Peña, M. (1971)	114
3.3.1.2 Callen, H. (1985)	115
3.3.1.3 Shannon, C. (1949)	116
<b>3.4 La entropía como desorden</b>	<b>121</b>
3.4.1 La entropía como información	122
<b>3.5 La evolución de la entropía. ¿Qué y por qué cambió el concepto de entropía</b>	<b>124</b>
3.5.1 Consideraciones alrededor del concepto de entropía	127
<b>Capítulo 4. Los difusores - profesores. Definiciones y representaciones de la entropía</b>	<b>133</b>
<b>4.1 Vertiente educativa</b>	<b>133</b>
4.1.1 Trabajo de campo	133
4.1.2 Organización de la entrevista	135
<b>4.2 Planeación del instrumento</b>	<b>135</b>
4.2.1 Guía de la entrevista. Aspectos a considerar en su construcción	135

4.2.1.1 Dificultades para la enseñanza de la entropía	136
4.2.1.2 Fundamentos de la entropía	137
4.2.1.3 Enseñanza de la entropía	137
<b>4.3 Dimensiones de análisis: histórica, epistemológica, enseñanza</b>	<b>138</b>
4.3.1 Categorías analíticas de cada dimensión	138
4.3.1.1 Dimensión histórica	139
4.3.1.2 Dimensión epistemológica	139
4.3.1.3 Dimensión de enseñanza	140
<b>4.4 La entrevista</b>	<b>142</b>
4.4.1 Guía de la entrevista	142
4.4.2 La muestra	142
4.4.3 La aplicación del instrumento	143
4.4.3.1 Entrevistas a los profesores	143
4.4.3.2 Entrevista con el Dr. Leopoldo García-Colín Scherer	144
<b>4.5 Análisis de los resultados. Cruces de las respuestas con las dimensiones</b>	<b>148</b>
4.5.1 Respuestas - dimensión histórica	154
4.5.2 Respuestas - dimensión epistemológica	155
4.5.3 Respuestas - dimensión de Enseñanza	156
<b>4.6 La evaluación de la entropía por los profesores</b>	<b>156</b>
<b>Capítulo 5. Representaciones múltiples. Enseñanza de la entropía</b>	<b>161</b>
<b>5.1 Definiciones y representaciones para la entropía en los profesores entrevistados</b>	<b>162</b>
5.1.1 Perfil epistemológico para el concepto de entropía	165
<b>5.2 Dos actitudes epistemológicas o representaciones mentales en la termodinámica</b>	<b>168</b>
5.2.1 Las representaciones en los libros de texto más citados por los profesores	170
<b>5.3 Diversas aproximaciones para la enseñanza de la entropía</b>	<b>172</b>
5.3.1 Experiencias de profesores	172
5.3.2 Perfil conceptual de Mortimer (PCM)	178
5.3.2.1 Características del PCM	181
5.3.2.2 Un ejemplo de aplicación del PCM	183
<b>5.4 Elementos para estructurar una propuesta para la enseñanza de la entropía</b>	<b>186</b>
5.4.1 Referentes teóricos	186
5.4.2 Vertientes histórica y educativa	191
<b>5.5 Propuesta de enseñanza de la entropía. Fases de la propuesta</b>	<b>193</b>
5.5.1 Fase I De reflexión. Guía de análisis didáctico	194
5.5.2 Fase II. De acción. Desarrollo de la enseñanza.	196

5.5.2.1 Fase II. Etapa 1. Perfiles epistemológicos previos	196
5.5.2.2 Fase II. Etapa 2. Construcción-apropiación del contenido disciplinario	197
5.5.2.2.1 Matriz disciplinaria	198
5.5.2.2.2 Una presentación alternativa del concepto de entropía	201
5.5.2.3 Fase II. Etapa 3. Perfiles epistemológicos al término del proceso	209
5.5.3. La historia. Elemento imprescindible	211
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b>	<b>213</b>
<b>6.1. Vertiente Histórica. Objetivos. Constructores y Continuadores</b>	<b>215</b>
6.1.1 Clausius. Planteamiento original para la entropía	215
6.1.2 Boltzmann	217
6.1.3 Continuadores. La evolución de la entropía	218
<b>6.2. Vertiente Educativa. Los Difusores</b>	<b>220</b>
6.2.1 Libros de texto	220
6.2.2 Profesores	221
6.2.3 Enseñanza	223
<b>6.3. Hallazgos</b>	<b>224</b>
<b>6.4. Preguntas y respuestas</b>	<b>225</b>
<b>6.5. Definiciones para la entropía</b>	<b>227</b>
<b>6.6. Conclusión general</b>	<b>229</b>
<b>6.7 Sugerencias para la continuación de este estudio</b>	<b>229</b>
6.7.1 Para el concepto de entropía	229
6.7.2 Para la enseñanza	231
<b>REFERENCIAS</b>	<b>233</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>247</b>
<b>1.1 Historia del concepto de entropía. Rudolph Clausius</b>	<b>248</b>
<b>4.1 Guía de entrevistas</b>	<b>257</b>

# ORIGEN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA REPRESENTACIONES E IMPLICACIONES PARA SU ENSEÑANZA

## PRESENTACIÓN

El concepto de entropía tiene su origen en Clausius de una manera que algunos califican como poco clara. Con el transcurso del tiempo la entropía ha estado sujeta a interpretaciones de diversa índole que han añadido otras formas de verla. Los libros de texto en la transmisión del concepto muestran desconocimiento de estas dificultades y mezclan representaciones complicando aún más la comprensión del concepto. A su vez, las representaciones de los profesores son tributarias en buena medida de esos textos, lo que no añade claridad a la comprensión de la entropía por parte de los alumnos.

La explicación original dada por Clausius para la entropía, constituida de una parte macroscópica y otra microscópica, ha desaparecido del ámbito de la termodinámica lo que, desde nuestra perspectiva, ha constituido una pérdida para la comprensión integral de un concepto de entrada abstracto y difícil.

Esta desaparición, las razones y las implicaciones educativas derivadas de esa pérdida constituyen los elementos del problema que orientará este trabajo de investigación que persigue los objetivos siguientes:

- Contribuir al esclarecimiento y comprensión del concepto de entropía a partir del seguimiento de la evolución del concepto desde su planteamiento original con Clausius hasta la época actual
- Plantear la estructuración de elementos que contribuyan a mejorar la enseñanza del concepto de entropía

De esta manera, la pérdida de la expresión original de Clausius y de la componente cinética guiará nuestra investigación través de

1. La comprobación de la existencia de la expresión original y de tal pérdida
2. Las razones de esa pérdida
3. Las implicaciones de la pérdida tanto conceptuales como educativas

Para ello hemos estructurado una propuesta de seguimiento del concepto a través de los *sujetos*, iniciando con los que lo originaron.

Desde esta perspectiva se introduce un análisis diacrónico de la entropía a través: de los científicos que originaron el concepto y que hemos denominado *constructores*; de los que han seguido trabajando con el concepto, lo han fortalecido o complementado, y que hemos llamado los *continuadores*; y de quienes lo han hecho del conocimiento general, denominados para nuestros fines *los difusores*. Los autores de libros de texto y los profesores se encuentran en esta última categoría.

A partir de este marco categorial, se buscará dar respuesta a las preguntas siguientes:

A partir de los *constructores*:

1. ¿Qué es y cuál es la génesis de la entropía original con Clausius?
2. ¿Qué es la entropía con Boltzmann, y su relación con el desorden?

A partir de los *continuadores*:

3. ¿Cuál ha sido la evolución del concepto?

A partir de los *difusores*:

4. ¿Cómo desarrollan e interpretan la entropía los libros de texto?
5. ¿Cómo definen, desarrollan y representan la entropía los profesores?
6. ¿Qué implicaciones para la enseñanza de la entropía tienen estas representaciones-interpretaciones?

La construcción de un marco de interpretación y la determinación de los instrumentos analíticos es el primer paso y se presenta en el Capítulo 1. Al respecto, se organiza la investigación alrededor de dos vertientes: una histórica y otra educativa.

### **Vertiente Histórica**

Con relación a la primera vertiente, consideramos que una revisión histórica clásica es insuficiente para acceder con una mayor profundidad al análisis de las representaciones para la entropía y del porqué sufre un cambio su concepción original. Por ello, nos planteamos el acercamiento al problema a partir de nociones provenientes de la filosofía de la ciencia desde dos enfoques: el empirismo lógico y el de la nueva filosofía de la ciencia.

El empirismo lógico provee una explicación semántica desde una concepción tradicional de la ciencia mientras que desde la nueva filosofía se introducen nociones explicativas como la significación, el sentido y el cambio conceptual, entre otros, que abren espacio para el sujeto

y la teoría que orienta sus observaciones, y permiten efectuar un análisis más fino del cambio.

### **Vertiente Educativa**

Con relación a la segunda vertiente, el análisis de los difusores y la estructuración de elementos para la enseñanza de la entropía, se realiza, además de la aplicación de las nociones filosóficas mencionadas, a partir de los postulados de la corriente constructivista; de las dimensiones histórica, epistemológica y de enseñanza; de la noción de multirrepresentacionalidad desprendida del perfil epistemológico de Bachelard, (1993), del perfil conceptual de Mortimer (1995) y de la matriz disciplinaria de Kuhn, (Posdata 1975)

En una descripción breve de los capítulos, en el primero se construye el problema de investigación tomando como base el trabajo de Brosseau & Viard (1992), se presenta el marco teórico, se justifican los instrumentos analíticos y se plantean los objetivos de la investigación.

Con el segundo capítulo, referido al origen y la evolución del concepto de entropía, se da respuesta a las tres primeras preguntas planteadas anteriormente, a través de la revisión análisis y discusión de los trabajos de los constructores y de la correspondiente revisión de los trabajos de algunos representantes de los continuadores. De cada científico: se resalta el *propósito* de su investigación u obra, la *definición*, el *desarrollo matemático* y el *sentido físico*, (*interpretación o explicación*) que le otorgan a la Segunda Ley y a la entropía, cuando son explícitos.

El desarrollo matemático con el que cada uno presenta la entropía, para su comparación, si es breve, como en el caso de Planck (1945) y Sommerfeld (1956), se reproduce en su esencia en el texto. Cuando es más extenso, como el caso de Fermi (1936) y Schrödinger (1952), se reproduce para abreviar en forma de diagrama de flujo.

El orden cronológico en el Capítulo 2 determina la presentación de los autores. Siguiéndolo, se inicia con los *constructores*: Clausius (1991) y Boltzmann (1964). Los *continuadores* empiezan con Planck, Fermi, Schrödinger y Sommerfeld, abarcando con ellos el periodo de un siglo (desde 1850 con estudios de Clausius hasta mediados del siglo XX, la década de los cincuenta, con los escritos de Sommerfeld). En el mismo capítulo se incluye por su importancia, una breve semblanza de Gibbs (1961) y Carathéodory (1909).

El Capítulo 3 inicia el recorrido con los difusores, analizando una muestra de autores de libros de texto de los que, de manera análoga a lo realizado en el Capítulo 2, se destaca la presentación que adoptan para la segunda ley y la entropía, tanto en su desarrollo como en las definiciones, y representaciones para, posteriormente, revelar los acuerdos o desacuerdos de estos autores con los fundadores-constructores y apreciar la evolución de la entropía con base en los objetivos planteados y a partir de nuestro marco de interpretación.

Continuando con los difusores-profesores, en el Capítulo 4 damos cuenta del trabajo de campo realizado con profesores de termodinámica en el nivel universitario. Una muestra de ellos fue entrevistada. Se incluye la entrevista concedida por el Doctor García-Colín Scherer. Asimismo, se describe y justifica la construcción del instrumento/guía de preguntas utilizada y se reportan los resultados obtenidos y su análisis

En el Capítulo 5, se reportan las definiciones y representaciones que los profesores entrevistados refieren para la entropía, a saber: cinco definiciones y siete representaciones, para una muestra con 12 profesores. Su diversidad y amplitud conlleva a la aceptación del carácter multirrepresentacional de la entropía en los sujetos y a la coexistencia de esas representaciones. Lo anterior puede explicarse a partir de la noción de Perfil Epistemológico de Bachelard (1968). Terminamos el Capítulo 5 y el estudio realizado, con la presentación de elementos para estructurar una propuesta didáctica y con la enunciación de consideraciones relacionadas con la entropía.

La estructuración de los elementos para la propuesta de enseñanza para la entropía está apoyada, además de en Bachelard (1993), en algunas consideraciones del Modelo de Aprendizaje de Mortimer (1995), al que nombra "Perfil Conceptual", y fundamentalmente se asienta en la Matriz Disciplinaria de Kuhn (Posdata, 1975).

Como elemento principal, la propuesta descansa en la realización por parte de los profesores de un análisis didáctico previo a la enseñanza del concepto. Se plantea una Guía de Análisis como un auxiliar para el profesor y, se ejemplifica la presentación de la expresión original de Clausius en el aula, en el desarrollo de algunos puntos de la propuesta con relación a la entropía.

Con el Capítulo 6 se termina este estudio y se establecen las conclusiones relacionadas con los objetivos y las preguntas que motivan este trabajo considerando las vertientes histórica y

educativa que lo constituyen. Como síntesis de algunas de ellas, se confirma la desaparición y olvido de la definición original de Clausius y el hallazgo de una constelación de definiciones y representaciones para la entropía que existen y coexisten tanto en los libros de texto como en los profesores. Como conclusión, consideramos que la definición de Clausius debe ser recuperada para que, incorporada a la constelación encontrada, sea confrontada con las otras definiciones y representaciones que la constituyen. Tal confrontación se considera indispensable pues estamos convencidos de que con ella, la comprensión de la entropía por parte del alumno se verá beneficiada y sin duda enriquecida.

Establecemos para terminar que la justificación de la realización de un trabajo similar a este tendrá que buscarse y ser ubicada dentro de la necesidad humana de llenar los vacíos que se detectan en las tramas disciplinarias.

Nosotros hemos detectado la incompreensión de un concepto, como es el concepto de entropía, por demás importante en la termodinámica, y la hemos considerado como un vacío en el campo pedagógico-disciplinario, por lo que nos hemos esforzado en llenarlo como un aporte a la didáctica de la termodinámica. Con ello, nos adscribimos con Duit (2006) a un campo multidisciplinario de investigación en la enseñanza de la ciencia, que aspira a mejorar la educación en el punto de confluencia de la historia, la filosofía y la ciencia.

Habremos cumplido nuestra meta y sentiremos una alta satisfacción si este estudio inspira la realización de otros análogos dentro de los campos de la ciencia que requieran de semejante aclaración conceptual y pedagógica.

## CAPÍTULO 1. PROBLEMA, INSTRUMENTOS ANALÍTICOS Y OBJETIVOS

### 1.1 Problema de investigación

Uffink (2001) nos dice que la Segunda Ley de la Termodinámica, 40 años después de su aparición, estaba rodeada de tanta confusión que la Asociación Británica para el avance de la Ciencia decidió apoyar un Comité especial con la tarea de proporcionar claridad acerca del significado de esa ley, cometido que no pudo conseguir (Bryan, 1891). Bridgman, en 1940, continúa con esta queja y aún ahora, subraya Uffink (2001), la Segunda Ley permanece tan oscura que continúa atrayendo nuevos esfuerzos para su clarificación.

Dicha confusión se traslada al campo educativo en el que la enseñanza de la Segunda Ley y particularmente de la entropía se vuelve, o engañosamente fácil o de alta dificultad, toda vez que como una tesis de este trabajo se afirma que, en el aula, la noción de entropía se presenta con una claridad conceptual recortada e incompleta.

En esta investigación consideramos que al menos, parte de la confusión de la Segunda Ley y de la entropía puede ser consecuencia de los sucesivos desarrollos de esa ley por parte de Clausius (1850 y 1862), Boltzmann (1872), Planck (1897) y otros, aunadas a las diferencias de interpretación, énfasis y significaciones que se manifiestan en las lecturas de los estudiosos interesados en la Segunda Ley como son los físicos, filósofos, matemáticos y educadores.

#### 1.1.1 Construcción del Problema

El trabajo de Brosseau y Viard (1992)<sup>1</sup> desempolva la versión original que para la entropía presenta Clausius en las Memorias VI publicadas en 1862.<sup>2</sup> Estos autores sugieren que la

---

<sup>1</sup> Debe señalarse que la realización de este trabajo fue inspirado por este estudio.

<sup>2</sup> Todas las referencias a Clausius son tomadas de la misma obra, con reedición en 1991.

poca relevancia que ha tenido la enseñanza de la versión original del concepto de entropía, ha contribuido a una pobre comprensión y a la confusión de esa noción. Apoyan su conclusión con base en el análisis de las respuestas de una muestra de 10 alumnos de postgrado en física a los que se les solicitó la contestación a la siguiente pregunta:

“Considere un gas aislado térmicamente que se expande de una manera reversible ¿Qué ocurre con la entropía del gas en esta transformación? Se aclara que previamente se había confirmado el conocimiento de todos ellos de la expresión:  $\Delta S = \Delta Q/T$ ”

La respuesta de 7 de los 10 alumnos fue inesperada<sup>3</sup> para los autores pues contestaron que la entropía del gas sufría un incremento, apoyados en el siguiente razonamiento:

“La entropía es el desorden o la medida del desorden; si el volumen aumenta, el desorden aumenta, en consecuencia la entropía aumenta.”

La respuesta según afirman los autores, es lógicamente correcta pues se sustenta en el silogismo siguiente (no planteado explícitamente por los autores):

**Premisa 1:** La entropía es la medida del desorden.

**Premisa 2:** El desorden aumenta con el volumen.

**Conclusión:** A mayor volumen mayor desorden y mayor entropía.

¿Por qué es entonces incorrecta la respuesta?

... porque, contestan Brosseau y Virad, la premisa 1 es incompleta.

... porque los alumnos “se olvidaron” de aplicar la fórmula conocida para la entropía

... porque, no se comprende el proceso sobre el que se pregunta.

---

<sup>3</sup> La respuesta correcta: “la entropía permanece constante.”

Esta última conjetura (en este caso particular) puede ser desechada de inmediato por la característica principal de la muestra que es la de estar constituida por estudiantes de postgrado en física, para los que el vocabulario básico de la termodinámica y sus procesos les son familiares.

La afirmación de que la premisa 1 es incompleta surge del análisis comparativo entre la respuesta de los alumnos con la presentación original de Clausius, quien habla de dos componentes de la entropía: uno cinético “Y” y otro espacial “Z”, mismos que Brosseau y Viard denominan “entropía cinética” y “entropía espacial” respectivamente y cuya suma corresponde a la entropía total del cuerpo o sistema.

En la respuesta, los alumnos equiparan la entropía total con el desorden y toman en cuenta sólo la componente espacial-geométrica Z de la entropía así, dejan de lado o ignoran la componente cinética y ligada a la temperatura. Esta componente podría complementar sus herramientas conceptuales para analizar el proceso mencionado en la pregunta y aportar la respuesta correcta esperada. De esta manera la pérdida de la expresión original de Clausius y de la componente cinética guiará nuestra investigación través de

1. La comprobación histórica de la existencia o no de tal pérdida
2. Las razones de esa pérdida
3. Las implicaciones de la pérdida tanto conceptuales como educativas

El primer punto conduce hacia la indagación histórica del trabajo de Clausius, al contexto de descubrimiento<sup>4</sup>, el segundo punto orienta hacia los sujetos, hacia el ámbito filosófico, hacia el contexto de justificación y el tercero hacia el campo de la educación y particularmente hacia la enseñanza del concepto de entropía.

La Figura 1.1 muestra lo que se ha señalado hasta el momento y que en buena medida se corresponde con lo que Brosseau y Viard describen en su artículo.

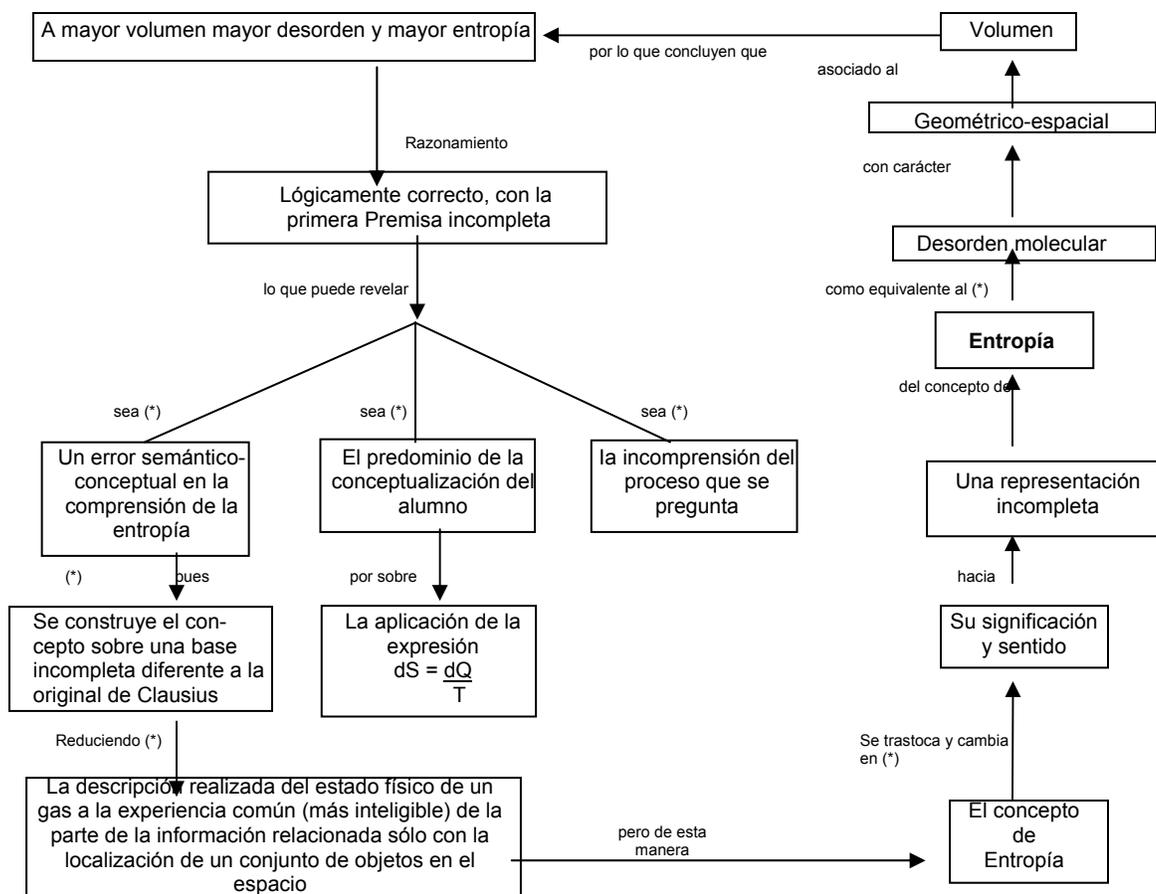
---

<sup>4</sup> Entendido como los define Reichenbach (1938) en el campo de la filosofía de la ciencia.

### Silogismo construido por los alumnos:

- Premisa 1:** La entropía es la medida del desorden.  
**Premisa 2:** El desorden aumenta con el volumen  
**Conclusión:** A mayor volumen mayor desorden y mayor entropía

### Respuesta de los alumnos:



**FIGURA 1.1 Interrogantes (\*) a partir del silogismo construido por los alumnos**

Los asteriscos (\*) marcan los puntos en donde se perfilan las interrogantes a las que se intentará dar una respuesta y que conforman los elementos del problema a ser investigado en este trabajo.

Destaquemos las interrogantes-componentes del problema de investigación, enunciadas de acuerdo al orden en el que se propone desarrollar este trabajo.

### **Interrogantes**

- \*1 ¿Por qué se considera esta concepción como un error semántico-conceptual en la comprensión de la entropía?
- \*2 ¿Por qué el desarrollo más completo de Clausius se reduce a la localización de un conjunto de objetos en el espacio?
- \*3 ¿Por qué se construye el concepto de entropía sobre una base diferente a la original de Clausius?
- \*4 ¿Cómo es que evoluciona el concepto de entropía desde Clausius a nuestros días?
- \*5 ¿Por qué los alumnos conceptúan a la entropía como equivalente al desorden molecular?
- \*6 ¿Por qué predomina la conceptualización del alumno por sobre la aplicación de la fórmula matemática conocida?
- \*7 ¿Por qué pudiera darse la incomprensión del proceso a preguntar?

Se aclara que estas preguntas no agotan las que puedan surgir del tema, pero sí marcan los puntos mínimos que son el señalamiento de un problema complejo, que aquí se asume, y al que la propuesta de Brosseau-Viard da una respuesta parcial. Estos puntos irán siendo complementados con el planteamiento de nuevas interrogantes necesarias para el análisis más detallado que se mostrará adelante.

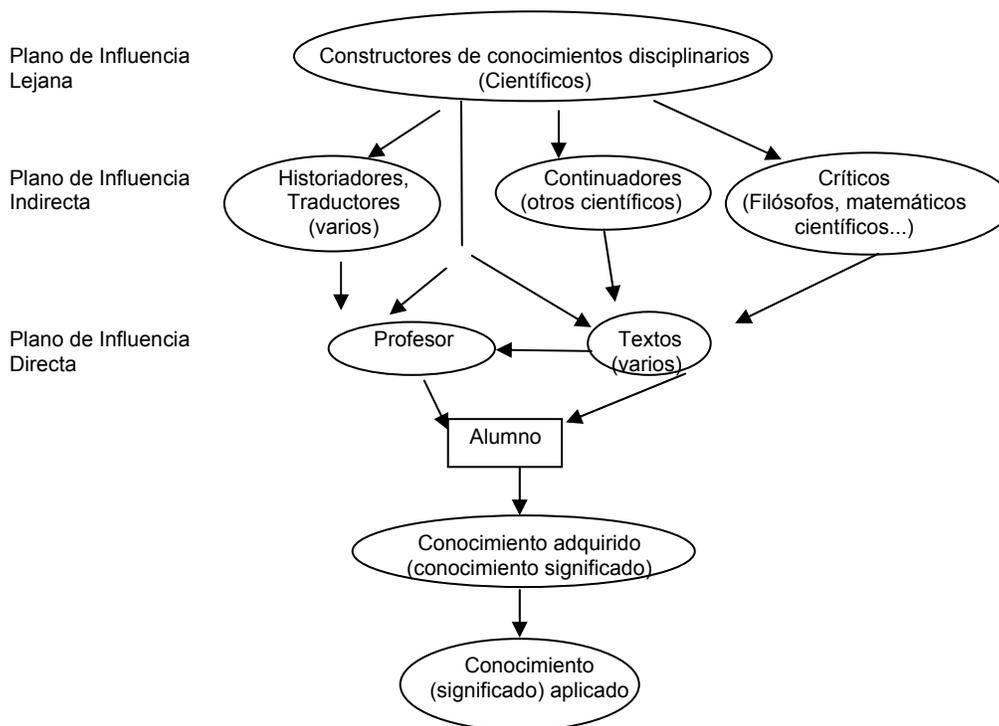
#### 1.1.2 Vertiente Histórica

La pregunta \*1, relativa a que la incomprensión de la entropía, es debida a un error semántico, nos ubica en terreno del lenguaje de la ciencia y nos orienta hacia los que lo originan que llamaremos genéricamente como los “productores de discurso”. La Figura 1.2 destaca las fuentes de información y de discurso que influyen al alumno en un contexto general de aprendizaje. En el plano de influencia directa están los libros de texto y el profesor; en un

segundo plano para el alumno, aparecen los traductores, los continuadores y los críticos del conocimiento científico y en el plano más alejado está la palabra de los constructores, de los generadores del conocimiento científico, que aunque marcado en la figura, impactan con poca frecuencia, de manera directa, a los profesores.

El resto de las preguntas constituirá el cuerpo de indagación de este trabajo.

#### Planos de Influencia en el Alumno:

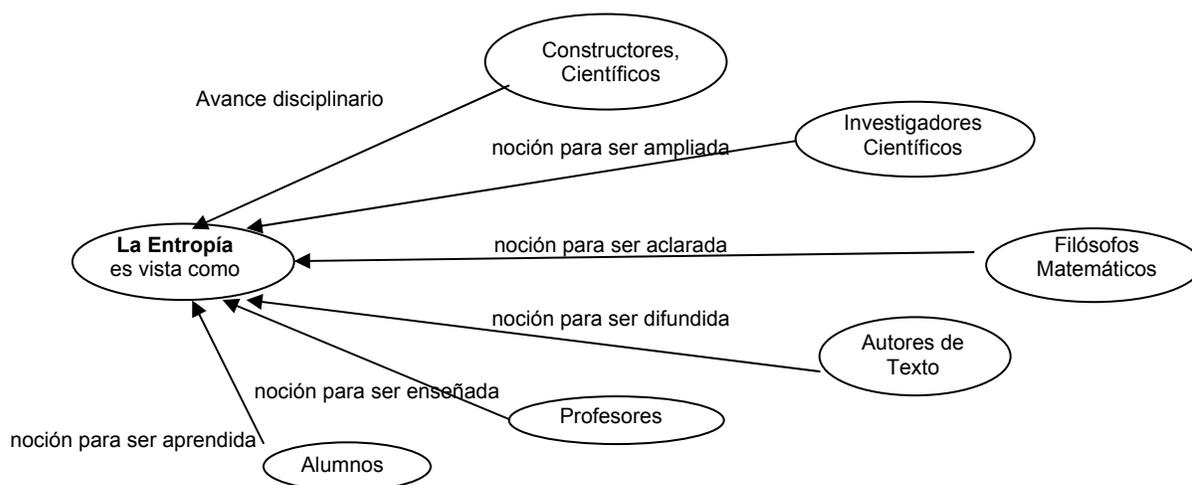


**FIGURA 1.2 Fuentes de información Disciplinar – Conceptual para el alumno.**

#### 1.1.3 Vertiente Educativa

El discurso original llega al alumno como resultado de una reconstrucción de segundo o tercer orden, mediado por los libros de texto y por la interpretación del profesor. La entropía, pensada por el momento como un concepto aislado, es mirada desde diferentes perspectivas

que la “*ven como*”<sup>5</sup>; esto es, los constructores científicos la ven como un avance disciplinario; los investigadores *como* una noción para ser analizada y ampliada; los filósofos de la ciencia y/o los matemáticos *como* una noción para someterla a escrutinio y para ser aclarada; los autores de texto la *ven* como una noción para ser difundida; los profesores *como* una noción para ser transmitida, enseñada y los alumnos la *ven como* una noción para ser aprendida (Figura 1.3).



**FIGURA 1.3** Se presentan las diferentes perspectivas, las diferentes miradas, los diferentes significados y los diferentes discursos.

Cada perspectiva, cada mirada “cargada de teoría” (Hanson, 1977) da lugar a diferentes discursos. Si se extiende la mirada hacia la termodinámica como un todo, “los que miran” son los mismos productores de discurso. Es posible entonces distinguir los grandes campos de interés relacionados con la investigación y con la tarea educativa.

La Figura 1.4 muestra los enfoques de los investigadores de la ciencia, la educación, de los filósofos de la ciencia y matemáticos. El enfoque educativo abarca tanto a los profesores como a los alumnos. Se explicita en la Figura 1.4 el propósito general de los discursos que se generan, los interlocutores o población a la que se dirige el resultado y discurso y el papel de

<sup>5</sup> Más adelante distinguiremos entre el ver, ver que y el ver como.

la termodinámica en cada enfoque. Se señalan algunos de los personajes representativos de cada enfoque, que serán mencionados en este trabajo.

ENFOQUES	INTERLOCUTORES	PROPÓSITO
<b>Investigación científica</b> (Carnot, Clausius, Thomson, Boltzman...)	Otros científicos (la comunidad científica)	Comunicación de hallazgos originales en el ámbito disciplinario
<b>Investigación Educativa</b> (Chi, Driver, Carey )	Investigadores educativos y Comunidad educativa	Comunicación de hallazgos originales en el ámbito educativo
<b>Filosófico</b> (Moulines, Ibarra, Uffink...)	Otros filósofos, científicos	Aclarar el discurso científico
<b>Matemático</b> (Truesdall, Silavy, Serrin,...)	Científicos, filósofos, matemáticos	Demostración rigurosa de los postulados, teoremas y leyes de la ciencia
<b>Educativo</b> (Profesores, Educadores...)	Comunidad educativa	Inteligibilidad y transmisibilidad

**FIGURA 1.4 Diferentes enfoques en la termodinámica<sup>6</sup>**

## 1.2. La evolución histórica de la entropía. Representaciones e implicaciones en la enseñanza. Instrumentos analíticos

La aproximación hacia la comprensión de la evolución de un concepto científico obliga a transitar por un terreno donde convergen múltiples disciplinas. Cada disciplina aporta una perspectiva y una posible explicación. ¿Cuál elegir? Desde luego el recorrido histórico y la revisión de algunos de los desarrollos clásicos de la entropía tienen que ser realizados para comprender los cambios del concepto en el tiempo, pero, ¿basta con ello? Consideramos que no, la revisión histórica es insuficiente para acceder a una mayor profundidad en el análisis del *por qué* sufre un cambio la concepción de entropía.

<sup>6</sup> Esta lista no agota los enfoques, faltaría mencionar, por ejemplo, el enfoque de los ingenieros que busca la aplicación práctica de la disciplina.

Para responder al por qué, deberemos acercarnos al problema a partir de nociones provenientes de la filosofía de la ciencia desde dos enfoques: el empirismo lógico y la nueva filosofía de la ciencia (Brown, 1998). El primero provee una explicación semántica desde una concepción tradicional de la ciencia; mientras que el segundo introduce nociones explicativas como la significación, el sentido y el cambio conceptual, entre otros, que abren espacio para el sujeto y permiten efectuar un análisis más fino del cambio. Desde esta perspectiva es que se introduce el análisis de los planos de influencia y los productores del discurso que se mencionan en las Figuras 1.2 y 1.3.

### 1.2.1 Para el Análisis Histórico

#### *1.2.1.1 Constructores, Continuadores y Difusores*

Para el análisis histórico, de los sujetos señalados en los planos de influencia de la Figura 1.2 enfocamos nuestra atención fundamentalmente en los *constructores*, es decir, en quienes construyen la ciencia y constituyen el plano de influencia más lejano para los alumnos. Dicho alejamiento, postulamos, es consecuencia de la poca presencia directa de estos constructores en los difusores del conocimiento científico, es decir, en los autores de texto y profesores, que constituyen el plano de influencia cercana para los alumnos. Esta situación buscará probarse en el presente estudio a través del dar respuesta a las preguntas relacionadas con el qué y el por qué del cambio en la entropía de Clausius. Para ello además, revisaremos el discurso de los científicos que recogen el conocimiento originado por los constructores y lo profundizan y/o amplían que denominamos *continuadores* y estudiaremos las obras de quienes lo hacen del conocimiento de la comunidad científica y educativa a quienes llamamos *difusores*<sup>7</sup>.

De esta manera, en el Capítulo 2, se realizará:

---

<sup>7</sup> La inclusión de los profesores en esta categoría no debe interpretarse como una reducción de la enseñanza.

- 1 Una revisión histórica del origen y evolución del concepto de entropía a partir del análisis del discurso de los constructores y continuadores.
- 2 Un análisis del cambio del concepto de entropía, a partir de las nociones provenientes del empirismo lógico y de la nueva filosofía de la ciencia.

### *1.2.1.2 Marco Filosófico*

Para el análisis filosófico, algunas de las interrogantes de la Figura 1.1 (por ejemplo las preguntas 1,2, y 3) nos remiten al campo del significado a través de la semántica y, ligado con el significado, a la noción de sentido. Esta afirmación plantea la necesidad de realizar una revisión del significado dentro de la filosofía de la ciencia. Para ello nos apoyaremos fundamentalmente en el desarrollo de Brown (1998) en su obra “La nueva filosofía de la ciencia”.

Por qué, cabría preguntarse, el problema educativo original de enseñar con éxito el concepto de entropía ¿nos deriva hacia la filosofía de la ciencia? La respuesta: porque es dentro del campo de la filosofía de la ciencia en donde el problema del significado es tratado tanto en el enfoque, lógico empirista como en el de la nueva filosofía.

Se eligen estas perspectivas teóricas porque a partir del empirismo lógico es posible acercarnos a su base empírica y positivista y a través de sus representantes Hume y Comte y aproximarnos, de ser necesario a los antecedentes epistemológicos y metodológicos remotos (Aristóteles, Bacon...) que pudieran conectarse con el análisis de las características que distinguen la investigación científica de la época y, con ello revisar el trabajo de construcción conceptual y disciplinaria de Clausius, Boltzmann y sus continuadores dentro del contexto de justificación.

Por otro lado, la nueva filosofía de la ciencia permite, complementariamente, analizar el contexto de descubrimiento del que “tajantemente se mantiene separado la corriente lógico-

empirista” (Popper, 1981) y acceder de esta manera al sujeto que, en tanto investigador, porta necesariamente conocimientos, creencias que “cargan su mirada” y que, en tanto sujeto social, actúa en un contexto científico-cultural determinado que lo influye.

De los numerosos representantes de la nueva filosofía se sigue, entre otros, fundamentalmente a Kuhn (1975) por considerar que su noción de paradigma y la distinción entre *el ver que* y *el ver como*, son adecuadas para el propósito de realizar el seguimiento del concepto de entropía a través de los sujetos y de la significación de su percepción.

Los enfoques lógico-empirista y el de la nueva filosofía, como parte del marco teórico que se usará en este trabajo, se caracterizan y describen a continuación.

### *1.2.1.3 Enfoque Lógico-Empirista*

Hasta mediados del siglo XX la tradición filosófica predominante para analizar la ciencia era la denominada lógico-empirista por las sólidas raíces en las que se sustentaba.

Efectivamente, esta tradición adopta como herramienta de análisis a la lógica formal y los postulados del empirismo para analizar la ciencia. En su análisis se enfrentan los problemas lógicos generales de buscar dilucidar la estructura lógica de las teorías y las relaciones lógicas entre los enunciados que describen observaciones y las leyes y teorías que estos enunciados confirman o refutan.

Los filósofos de este enfoque trazan una línea de separación “tajante entre lo que Reichenbach (1938) llama contexto de descubrimiento y el contexto de justificación. En el primer contexto estaría la actividad del científico, el proceso por el que el científico llega a pensar una teoría particular, pero esta actividad o proceso dicen, no le concierne al filósofo pues arguyen sería más de interés del psicólogo o sociólogo. Como ejemplos, Brown (1998) cita a Popper (1981) quien afirma:

El estado inicial, el acto de concebir o inventar una teoría no parece ni reclamar el análisis lógico ni ser susceptible de él [...] En consecuencia distinguiré tajantemente entre el proceso de concebir una idea nueva y los métodos y resultados de examinarla lógicamente...

Así pues en la corriente lógico empirista el filósofo se ocupa de las cuestiones lógicas que surgen sólo *después* de que ha sido formulada una teoría científica y esta actividad está en el terreno del *contexto de justificación*.

Dentro de este enfoque se puede distinguir, según Brown (1998), al empirismo con David Hume como su representante, al logicismo con Bertrand Russell, al positivismo lógico con Ludwig Wittgenstein y al empirismo lógico con Rudolph Carnap (1936). Todas estas corrientes tienen en común la aceptación de que la ciencia se expresa con *enunciados* por lo que se enfrentan a los problemas de la verdad de las proposiciones, de la confirmación de las hipótesis de la ciencia, del significado de los términos teóricos y de la explicación científica.

De estos problemas, el que guarda interés fundamental para nuestro trabajo es el que se refiere al *significado* de los términos teóricos, puesto que a la entropía se la ubica dentro de la categoría de no observable directamente. Al respecto, Hume realiza una distinción entre impresiones, ideas y lenguajes. Las dos primeras provienen de las percepciones de la mente, las impresiones son los objetos de los que se tiene conciencia, de los que se tiene experiencia cuando se percibe o se hace introspección. Las ideas son los objetos de los que se tiene conciencia y que son diferentes a las impresiones. Las impresiones y las ideas son para Hume todos los objetos de conciencia, pero no constituyen en sí mismas conocimiento hasta que se formulan proposiciones. De esta manera surge el problema de determinar si una proposición es significativa y qué proposiciones significativas son verdaderas. Si el término es la unidad básica del significado y éste existe sólo si para cada término hay una idea que le corresponda entonces sólo se podrá conocer el significado de un término si se ha tenido experiencia de las impresiones que forman la idea correspondiente. Una proposición que contenga un término sin significado es una pseudo proposición por tanto, asegura Hume, el ámbito del lenguaje significativo se encuentra limitado al ámbito de la experiencia posible.

Por su lado el logicismo según Russell (citado por Brown, 1998) se ocupa de conceptos definibles en términos de un número muy pequeño de conceptos lógicos fundamentales y todas sus proposiciones son deducibles a partir de ellos. Esta tesis la desarrollan Whitehead y Russell (1977) en su obra Principia Matemática. En ella se establece una distinción entre proposiciones elementales o atómicas y proposiciones moleculares. Las proposiciones elementales son o verdaderas o falsas y el valor de verdad de las proposiciones moleculares dependen de los valores de verdad de las proposiciones elementales que las constituyen por lo que en la evaluación de las proposiciones moleculares no juega ningún papel el significado o contenido de las proposiciones. Sin embargo, aceptándose que en el empirismo tradicional los términos adquieren significado una vez que se les ha puesto en relación con datos sensoriales, el empirismo enfrenta el problema de cómo dar significado a aquellos términos que se refieren a entidades no observables tales como la entropía o el electrón que son “*entidades inferidas*” no percibidas u observadas de manera directa. Russell propone como solución que se sustituyan las entidades inferidas por construcciones lógicas. Aunque la propuesta no está exenta de críticas y limitaciones, la noción de entidad inferida junto con la definición operacionalista de los términos de Bridgman (quien afirma que el concepto es sinónimo con el conjunto de operaciones que lo determina) creemos pueden ser útiles, junto con otras nociones del empirismo lógico para el planteamiento de cierto nivel explicativo en el análisis de la evolución del concepto de entropía.

En cuanto al **positivismo lógico**, es una forma de positivismo<sup>8</sup> que adopta la lógica simbólica de Russell (1977) y el Tractatus de Wittgenstein (1961) como fuentes de análisis de la ciencia. De hecho, el positivismo lógico reconoce como formas de investigación que producen conocimiento a la investigación empírica, que es tarea de las ciencias, y al análisis lógico de la ciencia, que es tarea de la filosofía.

---

<sup>8</sup> El término positivismo fue acuñado por Auguste Comte, se usa como nombre para una forma de empirismo estricto. El positivismo mantiene que sólo son legítimas las pretensiones de conocimiento fundadas directamente sobre la experiencia (Brown, 1998, p. 25)

La doctrina central del positivismo lógico es la Teoría Verificacionista del significado, cuya tesis es que una proposición contingente es significativa si y solo si puede ser verificada empíricamente; es decir si y solo si hay un método empírico para decidir si es verdadera o falsa. Si tal método no existe es una pseudo-proposición carente de significado. El valor de verdad de cualquier proposición con significado puede entonces ser determinado únicamente por medio de la observación y de la lógica.

El **empirismo lógico** es una versión más moderada del positivismo lógico pues acepta que las leyes científicas que son formuladas como proposiciones universales no pueden ser verificadas concluyentemente (como pide el positivismo lógico) a través de enunciados de observación, sin que por ello tengan que ser denominadas pseudo-enunciados sin significado. El empirismo lógico sostiene que las leyes son reglas que permiten extraer inferencias de unos enunciados observacionales a otros enunciados observacionales. No obstante, Carnap (1936) ante la imposibilidad de verificación concluyente, propone reemplazar la noción de verificación por la noción de “Confirmación gradualmente creciente” y toma como fundamental la noción de “predicado observable” y no la “oración” como toman los positivistas lógicos, reenfocando el interés hacia el significado de los términos científicos, esto es, al problema de cómo cobran significado los términos científicos.

Para evitar el problema de definir todo término teórico en función de observables como demanda el positivismo lógico, Carnap (1936) propone el nuevo método de las “oraciones reductivas” para introducir “términos disposicionales” y con ello todos los términos teóricos en el discurso científico. No profundizaré más en estas nociones aunque sí señalo que el propio Carnap años más tarde deja de sostener que los términos teóricos pueden ser tratados como términos “disposicionales” (Brown, 1998, p 51).

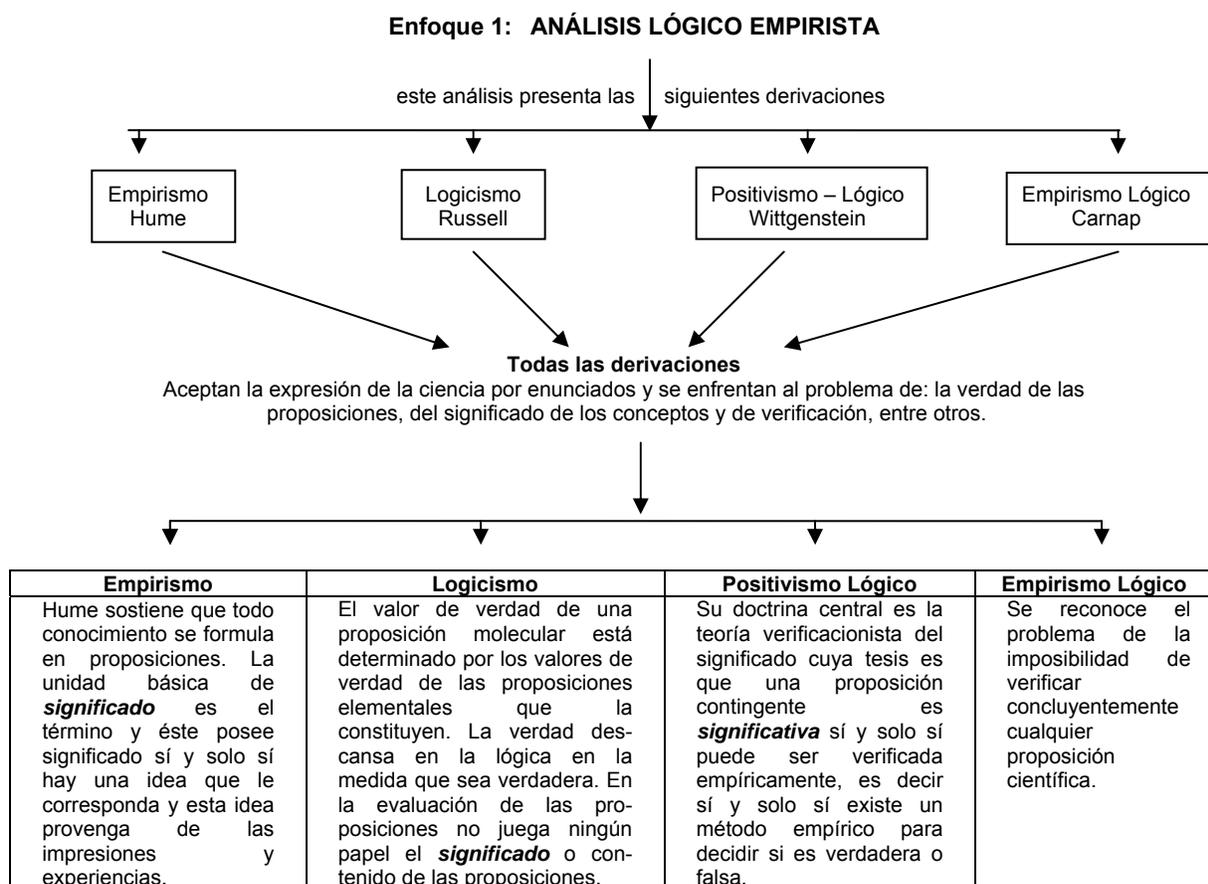
En suma, el interés de los empiristas por definir los términos teóricos, en términos de observables, deviene del deseo de eliminarlos (de reemplazarlos o de mostrarlos innecesarios) en el discurso científico y ser consistentes con su tesis fundamental que la tarea primaria de la ciencia es hallar conexiones entre observables.

Por último se mencionará dentro del enfoque lógico-empirista el trabajo desarrollado por Norman Campbell en 1920, que ha ganado aceptación entre los empiristas actuales y que parece ser un antecedente lejano de los Modelos Parciales Posibles (Flores, 1999), Modelos que pueden constituirse en una herramienta teórica en la exploración de la comprensión conceptual.

La significación empírica de los términos teóricos en Campbell (1920) se encuentra en la consideración que hace de una teoría científica como un sistema formal axiomatizado. Distingue entre dos partes de ese sistema formal: el “cuerpo de proposiciones teóricas” que se formula únicamente en el vocabulario teórico y una serie de “reglas de correspondencia” (o diccionario) que conectan funciones construidas por medio de los términos teóricos con términos observacionales.

En este análisis Campbell considera que los términos que aparecen sólo en las proposiciones teóricas, independientemente de las reglas de correspondencia, carecen de significado empírico. El significado empírico lo adquiere cuando son conectados con la experiencia por medio de las reglas de correspondencia.

Campbell pretende hallar una definición para cada término teórico. En general los términos teóricos no aparecen solos en una regla de correspondencia; más bien aparecerán como parte de una función de términos teóricos y pudieran no aparecer en las reglas de correspondencia. De ser así, estos términos, según Campbell, obtendrían su significado empírico en virtud de su ocurrencia en fórmulas en las que también están estos términos teóricos que sí aparecen en reglas de correspondencia. De esta manera se mantiene que es la experiencia la que da significado no tanto a los términos teóricos considerados individualmente, sino al sistema teórico completo. Como un resumen, la figura 1.5 muestra las derivaciones del enfoque lógico-empirista enfatizándose lo referente al significado.

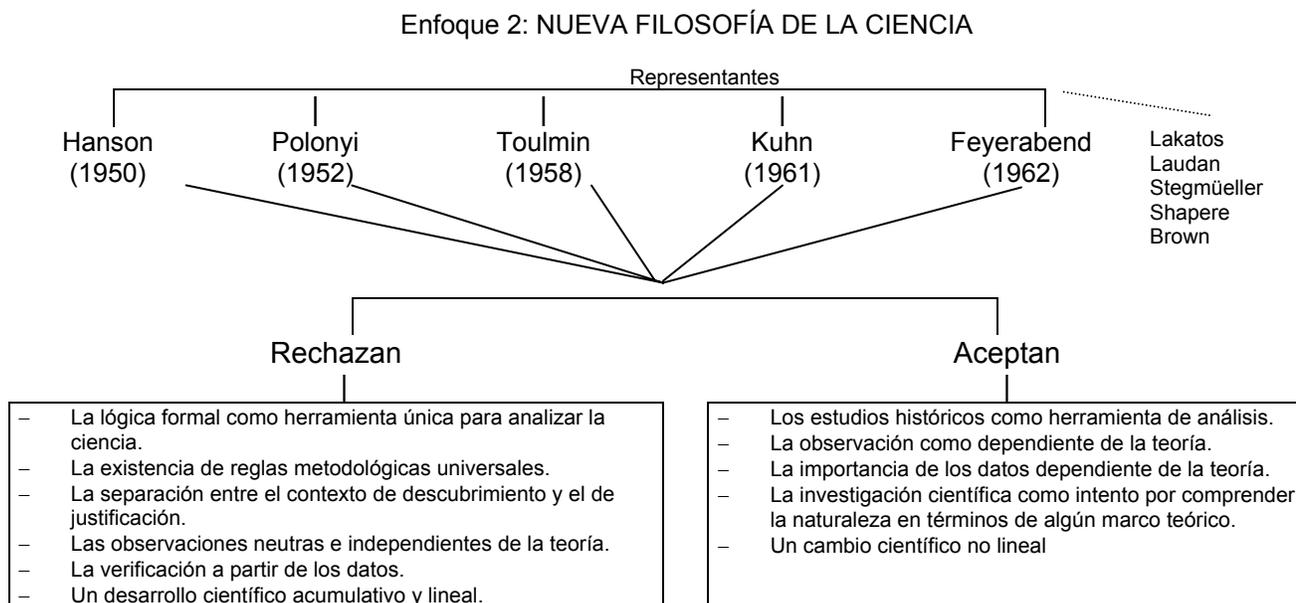


**FIGURA 1.5 Enfoques de la Filosofía de la Ciencia: Análisis Lógico- Empirista**

#### 1.2.1.4 Nueva Filosofía de la Ciencia

El segundo enfoque que Brown (1998) llama “nueva filosofía de la ciencia” surge como una crítica al análisis de la ciencia con la herramienta de la lógica. Los autores cuyas obras marcan el inicio de este enfoque son Norwood Hanson (1950), Michael Palanyi (1958), Stephen Toulmin (1961), Thomas Kuhn (1975. Su obra original data del año 1961) y Paul Feyerabend (1962).

La Figura 1.6 muestra las diferencias principales entre los enfoques de la nueva filosofía de la ciencia y el empirismo lógico.



**FIGURA 1.6 Enfoques de la Filosofía de la Ciencia: Nueva Filosofía de la Ciencia**

Harold Brown (1998), cuya obra se sigue de cerca en el planteamiento del marco teórico para este estudio, se ubica dentro de la nueva filosofía, corriente que ofrece nociones teóricas como “revolución científica”, “cambio conceptual”, “percepción significativa” y otras que consideramos posibilitarán la realización de un análisis más profundo y fino del cambio del concepto de entropía.

La nueva filosofía ataca uno de los elementos más importantes para el positivismo como es la objetividad. Esto es, va en contra de la tesis de que los hechos empíricos son conocidos independientemente de cualquier teoría, lo que según los filósofos de esta corriente garantiza la objetividad de la ciencia. La nueva filosofía, por el contrario, postula la inexistencia de una percepción neutra ajena a las creencias que sustente el sujeto que percibe. Se arguye de hecho que el conocimiento, las creencias y las teorías del que percibe juegan un papel fundamental en la determinación de lo que se percibe.

La modificación planteada origina problemas en el acto de ver <sup>9</sup> pues para deducir alguna información de la percepción es necesario ser capaz de identificar los objetos percibidos y para identificarlos es necesario disponer de un cuerpo de información relevante. La percepción significativa será aquella percepción con la cual se obtiene información.

En el caso de la percepción científica para “*ver*” lo que se realiza en un laboratorio científico se debe poseer un cuerpo relevante de teoría física, pues de no ser así, no es posible “*ver*” que el científico está midiendo una resistencia eléctrica, independientemente de la salud o agudeza visual del que mira. Así, un observador que carezca del conocimiento relevante no obtendrá la misma información al observar un experimento que la que obtiene un físico con experiencia. Ambos verán cosas diferentes al observar el mismo experimento. Esta diferencia entre la información obtenida es importante en la comprensión de la percepción significativa y la manera en que la percepción puede contribuir al conocimiento.

Si se acepta entonces “que el conocimiento y las creencias juegan un papel central en la determinación de lo que se percibe, entonces las teorías científicas mantenidas por un científico deberían jugar el mismo tipo de papel determinando aquello que él observa en el curso de su investigación; tomando prestada la frase de Hanson, la observación científica estará teóricamente cargada” (Brown, 1998, p. 107).

Dado lo anterior; no sorprenderá que dos científicos que sustenten teorías diferentes miren el mismo objeto y perciban cosas diferentes. Adicionalmente, bajo esta noción de percepción, el científico no registrará todo lo que observa de una situación, sino sólo aquello que las teorías que acepta indican que son significativas. Esto es, un científico identificará un fenómeno como anómalo si posee conocimiento para identificarlo, pues estaría observando su significado en términos de la teoría que mantiene. De no poseer ningún conocimiento o creencia acerca de lo que percibe, todo acontecimiento, dato o fenómeno, será carente de significado y los hará

---

<sup>9</sup> Se limitará la discusión a los casos de percepción visual por ser la más importante en la investigación científica Brown (1998, p. 103).

irrelevantes para el conocimiento. Las consecuencias de esta noción para la educación son claras y como tales serán tomadas en cuenta en la parte correspondiente en este trabajo.

La distinción entre “*ver*” simplemente y “*ver como*” la hace Khun (1975) quien es citado por Brown (p. 111). El “*ver como algo*” un objeto es un caso de percepción significativa pues el objeto es identificado o significado y la percepción está teóricamente cargada. Adicionalmente, se incluye el “*ver que*”, en esta distinción, en los casos en los que se reconocen no sólo objetos sino también hechos acerca de objetos o situaciones. En cada oportunidad en la que se obtenga información como resultado del “*ver*”, es una situación en la que “*veo que*” algo es el caso, y cuanto más se sepa de antemano de la situación en cuestión, más se podrá aprender.

El “*ver como*” puede considerarse como un caso particular del “*ver que*” esto es ver un objeto “*como*” un galvanómetro es “*ver que*” es un galvanómetro”. (Brown, 1998, p. 115). No se puede “*ver como*” si no se ve primero el “*que*”.

La Figura 1.7 recoge estas distinciones del “*ver*” provenientes de Khun (1975), Brown (1998) y sustentadas en la “mirada cargada de teoría” de Hanson (1971).

Ver -	Observar sin conocimiento relevante. Percepción no-significativa.
Ver como -	Observación de objetos identificados en términos de nuestro conocimiento, percepción teórica y conceptualmente cargada. Percepción significativa.
Ver que -	Observar con conocimiento relevante, percepción teóricamente cargada, de objetos identificados de hechos acerca de objetos y/o situaciones. Percepción significativa.

**FIGURA 1.7 Noción Base: Percepción Significada o Significativa**

(Distinciones de T. Khun, H. Brown, N. R. Hanson)

#### 1.2.1.4.1 Percepción significada y otras nociones teóricas

La noción de **percepción significada o significativa** se destaca aquí porque será una de las nociones teórico-explicativas más importantes que será utilizada en nuestro análisis a lo largo de todo el estudio, tanto en relación al seguimiento histórico como en lo referente a las implicaciones educativas. Para cerrar este punto se menciona que Brown (1998, p. 114) afirma en otro trabajo (Brown, 1972) que “es el significado de la situación observada lo que pasa a formar parte de nuestro conocimiento, y los objetos de la percepción significativa son, por tanto, significados”. Lo anterior lo ejemplifica con la lectura de un texto. En general, afirma, leer un texto es enterarse de su significado ya que la capacidad de leer un texto no es condición suficiente para su lectura, para ello es necesario ser capaz de leer en la lengua en la que está escrito y tener algún conocimiento del tema que se trata. Un adulto normal que no sepa nada de geología no puede leer un texto avanzado de geología porque no tendrá para él significado alguno. El significado real descansa en el conocimiento del tema pero, además, en el conocimiento de la lengua y del contexto. En suma, la percepción significativa está ligada al sujeto que percibe y es tributaria de sus creencias y de su conocimiento.

Puesto que nuestro propósito en esta parte del trabajo es dar cuenta de las nociones más importantes que serán de utilidad para la realización del análisis, plantearemos la noción de revolución científica y otras nociones relacionadas.

Se entenderá con Kuhn (1975) y Brown (1998), al término “revolución en la historia de la ciencia” como episodios que pueden durar muchos años, que ocasionan la reestructuración de los modos de pensamiento de una o más disciplinas. En otro nivel, las revoluciones en la ciencia generan cambios tanto en las presuposiciones de una ciencia como en los conceptos usados en ella.

Como paréntesis, conviene hacer notar la importancia de esta noción para nuestro propósito de analizar y explicar el cambio del concepto de entropía diacrónicamente. Efectivamente, las revoluciones científicas transforman las disciplinas y como resultado de estas transformaciones se modifican las creencias de los científicos, la estructura conceptual dentro de la cual trabajan, y los problemas de investigación a los que se enfrentan.

El cambio en los conceptos de planeta y masa son los ejemplos clásicos para mostrar su modificación antes y después de Copérnico, Kepler y Newton, y la concepción de masa antes y después de Einstein y su teoría de la relatividad.

La revolución científica abarca las presuposiciones de base y su cambio se refleja como se ha mencionado en los conceptos, cambio que puede ser examinado en términos de la distinción entre el sentido y la referencia del concepto modificado como lo presenta Brown (1998, p 151).

***El sentido de un concepto es entendido por Brown como ligado a las características definitorias del mismo dentro de un desarrollo científico particular.*** Al respecto, Brown señala el caso del concepto de planeta antes de Copérnico en el que se incluía como requisito para ser planeta, que se moviera alrededor de la tierra y en relación a las estrellas fijas. Después de Kepler y Newton el movimiento alrededor del sol (y no alrededor de la tierra) se había convertido en la nueva característica definitoria del concepto de planeta pero, para un pre-copernicano la afirmación, de que los planetas describen órbitas alrededor de las estrellas, afirmación posterior a los trabajos de Kepler-Newton, no hubiera tenido sentido alguno.

Una tesis fundamental del enfoque lógico-empirista es la suposición de que los significados de los conceptos son completamente independientes de las proposiciones en las que aparecen y que es posible aceptar o rechazar proposiciones sin que esto tenga efecto en lo que se significa mediante los términos que aparecen en ellas. Brown opina sin embargo que hay una

íntima relación entre el contenido de los conceptos y las proposiciones en las que aparecen (Brown 1998, p 151). Al respecto extiende una metáfora de Hempel (1966) y acepta que:

Un concepto científico es un nudo de una trama: los hilos de la trama son las proposiciones que forman una teoría; el significado de un concepto es su posición en la trama. Por tanto el significado de un concepto está determinado por los hilos que llegan a este nudo, por los otros nudos a los que el nudo en cuestión está conectado y por las ulteriores conexiones de estos otros nudos. En el caso del concepto de masa, son la segunda ley y el principio de gravitación, dos de los hilos principales, y este nudo está, además, ligado a los nudos que constituyen los conceptos de fuerza, aceleración, etc. Pero las distinciones entre escalares y vectores y entre los cálculos diferencial e integral también aportan hilos a este nudo. En suma, un concepto no es algo simple que o se capta enteramente o no se capta en absoluto, sino más bien un complejo que solo puede aprenderse poco a poco [...] a medida que desarrolla su comprensión de una teoría, al aprender más de los hilos que forman la trama se desarrolla además una comprensión más cabal de los conceptos implicados. (Brown, 1998, p. 157)

De nueva cuenta esta metáfora sugiere aplicaciones hacia la educación, de hecho se afirma que “no podemos aprender los conceptos de la mecánica newtoniana aislados entre sí, ni aislados de las proposiciones y fórmulas en que aparecen, ni, puesto que la mecánica newtoniana es física matemática, aislados de las operaciones matemáticas que se aceptan como legítimas. Aprender física newtoniana no es aprender primero los conceptos y luego coordinarlos en proposiciones; es aprender simultáneamente una constelación de conceptos y las proposiciones y fórmulas en las que aparecen” (Brown, 1998, p 156)

Para terminar con lo correspondiente a las nociones teóricas que constituyen el marco para el análisis histórico que realizaremos a lo largo de todo el trabajo, es necesario hacer una distinción entre sentido y significado e introducir la noción de inconmensurabilidad de Kuhn (1975).

En relación a lo primero, se ha dicho que Brown (1998) entiende el sentido de un concepto como ligado a las características definitorias del mismo dentro de un desarrollo disciplinario

particular. Entonces, los conceptos poseen un sentido **único** mientras las características definitorias no se modifiquen.

En Brown el sentido y la significación parecen ser consideradas como sinónimos. Por otro lado afirma que el significado de los conceptos cambia como resultado de una revolución científica. Lo que coincide con lo que al respecto, expresa el propio Kuhn en un párrafo citado por Pérez R. (1999) que reproducimos nosotros y en donde introduce también la noción de inconmensurabilidad. Esta noción pone al descubierto el cambio de significado que acompaña el cambio de paradigmas. Enseguida las palabras de Kuhn donde en 1983 explica la diferencia de la noción de inconmensurabilidad (que él utiliza) con respecto a la de Feyerabend; al respecto señala:

“Mi uso del término [inconmensurabilidad] era más amplio que el suyo [el de Feyerabend]; sus suposiciones respecto del fenómeno eran más radicales que las mías; pero nuestra coincidencia en aquel tiempo era sustancial.

Cada uno de nosotros estaba fundamentalmente preocupado por mostrar que los significados de los términos y conceptos –fuerza y masa por ejemplo o elemento y compuesto- cambiaban con frecuencia según la teoría en que aparecían. Y ambos afirmábamos que cuando ocurría este tipo de cambio era imposible definir todos los términos de una teoría en el vocabulario de la otra. Cada uno de nosotros incorporaba esta última afirmación al hablar de la inconmensurabilidad de las teorías científicas”. (Kuhn, 1983, p 669; citado en Pérez R., 1999, p. 85).

La inconmensurabilidad en la obra de Kuhn referente a la Estructura de las Revoluciones Científicas se caracteriza globalmente por plantear la transición revolucionaria o la relación entre dos paradigmas sucesivos. Incluye las diferencias que se presentan tanto en los aspectos cognitivos (en los sistemas conceptuales, los postulados teóricos...) como en los aspectos metodológicos. Posteriormente en los años setenta, citando otro párrafo de la obra de Pérez R. (1999), Kuhn:

“restringe el dominio de la relación de inconmensurabilidad a las teorías que se proponen en paradigmas sucesivos y más precisamente en sus léxicos o vocabularios. De esta manera la inconmensurabilidad queda acotada al terreno semántico: dos teorías son inconmensurables

cuando están articuladas en lenguajes que no son completamente traducibles entre sí. El cambio de significado que sufren ciertos términos al pasar de una teoría a otra impide que todos sus enunciados sean mutuamente traducibles. Cuando dos teorías contienen términos básicos que no son interdefinibles habrá afirmaciones de una teoría que no se puedan formular o expresar en el léxico de la otra [...] la inconmensurabilidad queda ligada al fracaso de traducción completa entre teorías. (Pérez, R.1999, p 86).

Destacamos que la noción de inconmensurabilidad restringida, en el contexto de la transformación de conceptos y aplicable posteriormente al caso de la entropía, será la que utilizaremos en el siguiente capítulo en el análisis del cambio de paradigma que se da con el nacimiento de la mecánica estadística, con Boltzmann como constructor.

#### 1.2.1.4.2 Significación conceptual y significación perceptual. Diferencias.

El significado de los conceptos (o su **significación conceptual**), y su cambio, está relacionado en Kuhn con el cambio de paradigmas, de las teorías o de su léxico, es decir, al contenido disciplinario. Este significado conceptual es diferente al significado que se menciona en la percepción significativa pues esta **significación está ligada al Sujeto que percibe, (significación perceptual)** a sus creencias y a su conocimiento.

Cuando Brown relaciona el sentido con el significado, se está refiriendo al significado conceptual disciplinario, a diferencia del enfoque lógico-empirista en el que se afirma que los significados de los términos no se modifican y son independientes de las proposiciones donde aparecen, ***la nueva filosofía de la ciencia acepta el cambio en el significado del concepto no sólo en la disciplina (que ocurre al haber cambios de paradigma o de la trama) sino también en la significación que para sí le otorga el sujeto.***

La **significación conceptual**, el significado disciplinario de un concepto (nudo con Hempel) dentro de la trama a la que pertenece, es **único** al igual que el sentido que le corresponde por el lugar que ocupa (sentido disciplinario de Brown). Es decir, su significado es estable en el tiempo, mientras el paradigma, los “hilos”, las proposiciones, fórmulas, presuposiciones,

principios, leyes..., **no se modifiquen** (estabilidad conceptual de Khun). Por su lado, la significación conceptual ligada a la **percepción, (significación perceptual)** no es ni única ni constante en el tiempo; depende, como ya se ha dicho, del sujeto que percibe, de sus creencias y del conocimiento que tenga tanto de la disciplina como del contexto.

La significación conceptual, relacionada con la disciplina coincide con el sentido disciplinario del término. Esta significación o sentido **siempre existe** aunque sea susceptible de modificarse de acuerdo a los cambios paradigmáticos.

Por su lado, la **significación perceptual** de un concepto **no siempre existe**, esto es, puede existir o puede no existir y más aún, su existencia puede darse por grados dependiendo del conocimiento de la trama disciplinaria del sujeto y puede (pensada cuantitativamente) aumentar (con un incremento en el conocimiento de la trama disciplinaria) o disminuir (si hay un decremento u olvido, en el conocimiento de la trama disciplinaria) o incluso como ya se dijo ser inexistente (si no se conoce nada de la trama disciplinaria); pero el sentido del concepto, en el individuo que percibe es completo y total. Ligado a la significación perceptual, el concepto o tiene sentido o no tiene sentido para el sujeto.

Por supuesto, se incluye la situación en la que la significación conceptual está basada en conocimientos disciplinarios incompletos o incorrectos pero que para el sujeto son ciertos y como tales le otorgan sentido al concepto. La distinción que nosotros hacemos entre lo que hemos llamado **significación conceptual** y **significación perceptual**, la consideramos **esencial** para el análisis que realizaremos.

Con la precisión de las significaciones en conceptual o disciplinaria y perceptual concluimos la presentación de las nociones principales que constituyen el marco teórico, o de interpretación, a saber: entidad inferida, operacionalismo, revolución científica, cambio conceptual, significación conceptual y perceptual, inconmensurabilidad y nociones del enfoque constructivista

El problema, la pregunta y el procedimiento que desarrollaremos para el análisis histórico se presentan en la Figura 1.8. De ella puede desprenderse que procedimentalmente examinaremos la evolución<sup>10</sup> del concepto de entropía a través del análisis tanto de las relaciones entre teorías sucesivas, enfocados en lo disciplinario, como los instrumentos intelectuales usados por los científicos que se han seleccionado como representativos del área a examinar. Nos referimos a los constructores, como Clausius y Boltzmann y a continuadores como Planck, Fermi y otros.

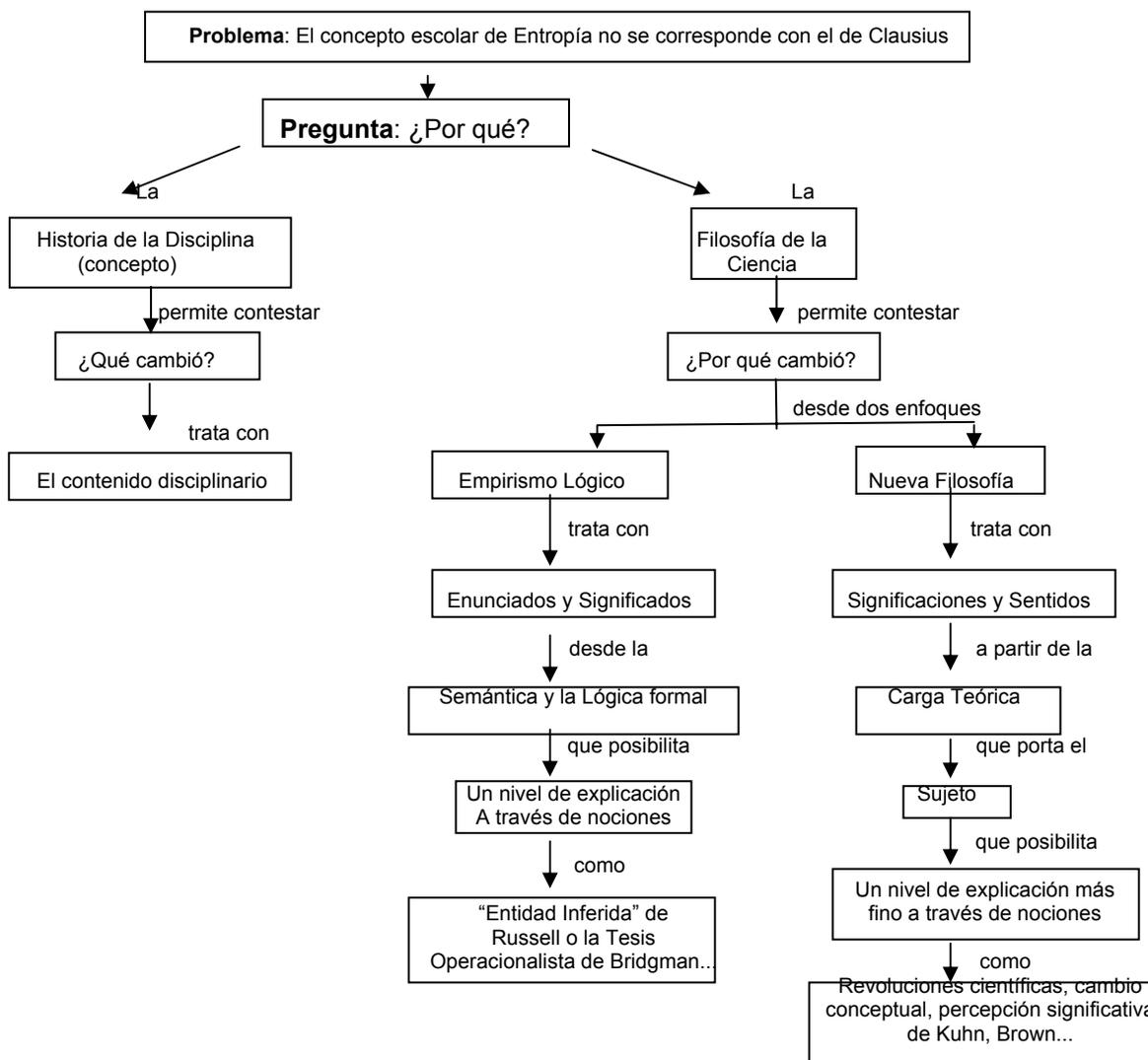
Todo lo anterior se sustentará en la revisión histórica de los acercamientos de estos científicos al concepto de entropía por lo que claramente nos ubicamos dentro del enfoque de la nueva filosofía de la ciencia en su versión browniana y kuhniana principalmente. No obstante, se plantea adicionalmente la consideración de que algunas nociones del enfoque lógico-empirista pueden aportar claridad en un cierto nivel explicativo al desarrollo del concepto de entropía.

Así mismo a través de las preguntas 1,2 y 3 que exploran lo que constituyó el cambio y las razones del mismo, se realiza el seguimiento del recorrido histórico de la entropía y con ello se asienta una base teórica para la indagación de las implicaciones educativas en los difusores, tanto en lo que se refiere a los libros de texto como a la percepción y acción de los profesores.

De esta manera las dos vertientes, histórica y educativa, que Brosseau y Viard tocan en su trabajo, son retomadas en la búsqueda de la explicación de la pérdida de la componente cinética de la entropía de Clausius y en la determinación de las repercusiones que esa pérdida ha tenido en la enseñanza del concepto y en las representaciones de la entropía que se manifiestan en los autores de los libros de texto y en los profesores.

---

<sup>10</sup> Se está consciente que el término evolución tiene implicaciones de continuidad y no de cambio por lo que podría considerarse el compromiso implícito y "a priori" con un enfoque determinado. No es así. Aquí tomaremos los términos evolución y cambio como sinónimos.



**FIGURA 1.8 Problema, Pregunta, Procedimiento: El Concepto de Entropía. Marco Teórico-Explicativo**

### 1.2.2 Para las implicaciones educativas

Dentro de la educación la delimitación de las conceptualizaciones y representaciones para la entropía tanto en los sujetos como en los libros de texto y el papel que juegan en la enseñanza se vuelve relevante como factor que influye en el aprendizaje de los alumnos.

El análisis de la segunda vertiente relacionada con lo educativo requiere de la introducción de otras nociones teóricas que complementen las que constituyen el marco de análisis de la vertiente histórica.

Importa aclarar que, a diferencia del marco filosófico,- que fue introducido “*a priori*” como parte integral del proyecto de tesis- la introducción de las nociones teóricas complementarias que a continuación se describen, fue necesaria “*a posteriori*”, a la luz del desarrollo y los resultados de la investigación, obtenidos del trabajo con los autores de los libros de texto y del trabajo de campo llevado a cabo con los profesores. En efecto, en la búsqueda de dar respuesta a las preguntas 4, 5 y 6, (de la pág. 5) componentes del problema de investigación que involucran al alumno y, en nuestro esquema categorial a los difusores, se evidencia la existencia de representaciones múltiples para la entropía que puede ser explicada a través del perfil epistemológico de Bachelard como se apreciará más adelante.

Situados en el aula, una enseñanza que: aspire a la comprensión integral, explore y tome en cuenta los conocimientos, las preconcepciones o ideas previas de los alumnos acerca del tema, plantee espacios de discusión y reflexión para los alumnos y en la que el papel del profesor sea más de coordinador y facilitador del aprendizaje, será la que se aproxime hacia la creación y recreación de estructuras conceptuales de conocimiento, en ambientes abiertos de aprendizaje y estará guiada por una actitud epistemológica constructivista.

En la nueva filosofía, ámbito en el que este trabajo se ubica, se asume al constructivismo como una teoría de conocimiento que en su versión radical con Von Glasersfeld (1989) rompe con las filosofías tradicionales al considerar, entre otras cosas, a la ciencia como una construcción intersubjetiva, al conocimiento como una construcción subjetiva basada en esquemas representacionales y a la realidad como incognoscible.

La concepción de un aprendizaje constructivista y la de una enseñanza orientada por esta corriente guiarán nuestro análisis e interpretación; así como el planteamiento de las sugerencias didácticas para la enseñanza del concepto de entropía. Además, las nociones de “perfil epistemológico” y de “matriz disciplinaria” provenientes de Bachelard (1968) y de Kuhn (1971) respectivamente, apoyarán la propuesta educativa. La noción del perfil de Bachelard, nos será útil para dar cuenta de la multirrepresentacionalidad de la entropía y la noción de matriz disciplinaria de Kuhn para ordenar y justificar la propuesta de enseñanza de la misma, como se desarrollará en el capítulo 5. Las implicaciones de las representaciones se desprenderán del examen de los “difusores”

#### *1.2.2.1 Difusores: autores de libros de texto y profesores*

En el ámbito escolar la comprensión del concepto de entropía origina múltiples desafíos para el alumno, que se agravan cuando los factores que influyen directamente el aprendizaje (como son el profesor y los libros de texto), no presentan a la entropía con la claridad conceptual integral que sería deseable.

La aseveración anterior que tiene como origen el artículo de Brosseau y Viard, planteada como pregunta: ¿porqué la presentación del concepto de entropía por parte de los profesores y textos no conduce a su comprensión integral? constituye esencialmente la pregunta de investigación que orienta la vertiente educativa, en la que se asume como respuesta y tesis, que la pérdida de la construcción clausiana original para la entropía es un factor importante que influye negativamente en la comprensión integral del concepto de entropía por parte del alumno.

La tesis que se ha planteado nos remite al aula y al profesor de nivel superior quien como docente, en el común de los casos, planea y actúa su docencia y evalúa sus logros a través del aprendizaje alcanzado por sus alumnos. En la indagación de esos momentos, a través de una entrevista, en relación con la planeación se explorarán los referentes disciplinarios que la

sustentan. En la actuación se explorará la presentación de la entropía y su evaluación en los alumnos.

En esta investigación, como se ha mencionado, se asumen los postulados constructivistas como puntos de referencia para apreciar la cercanía o el distanciamiento de la enseñanza para la entropía que los profesores refieran en la entrevista programada para ellos en el trabajo de campo. Las características del constructivismo se enuncian a continuación.

#### *1.2.2.2 Marco Constructivista*

A Piaget se le atribuye comúnmente el origen del constructivismo (aunque en la Figura 1.9 se muestra parte de la extensa genealogía de esta concepción en la que todavía podría incluirse a Sócrates y a Comenio entre otros) al sostener una posición opuesta a las concepciones epistemológicas realistas y empiristas y, por tanto, opuestas también a las teorías de aprendizaje asociacionistas. Piaget defiende una concepción constructivista en la apropiación del conocimiento que se caracteriza, como precisan Gómez-Granell y Coll (1994) por lo siguiente:

- Entre sujeto y objeto de conocimiento existe una relación dinámica y no estática. El sujeto es activo frente a lo real, e interpreta la información proveniente del entorno.
- Para construir conocimiento no basta con ser activo frente al entorno. El proceso de construcción es un proceso de reestructuración y reconstrucción, en el cual todo conocimiento nuevo se genera a partir de otros previos. Lo nuevo se construye siempre a partir de lo adquirido, y lo trasciende.
- El sujeto es quien construye su propio conocimiento. Sin una actividad mental constructiva propia e individual, que obedece a necesidades internas vinculadas al desarrollo evolutivo, el conocimiento no se produce.

Aunque estos principios continúan presentes en las principales versiones del constructivismo que actualmente se reconocen y que Marín *et al* (1999) identifican como: 1) constructivismo piagetiano, 2) constructivismo social, 3) constructivismo humano y 4) constructivismo radical, las tres últimas versiones surgen a partir de una dispersión de influencias y de estudios empíricos.

Según Marín *et al* (1999), la versión social del constructivismo se mantiene en una posición de privilegio frente a los demás, pese a las críticas de ser un desarrollo con ausencia de bases teóricas. Respecto a esta crítica, Solomon (1994) disiente y mantiene que este nuevo constructivismo si se puede calificar de teoría “en cuanto que define un nuevo vocabulario como modelos interpretativos, esquemas alternativos y concepciones erróneas” con los que es posible redescubrir una serie de fenomenologías o problemáticas relacionadas con esos términos.

A su vez, la versión radical del constructivismo (CR) concita tanto voluntades hacia la crítica (Mathews, 1992; Osborne 1996) como hacia su defensa (Staver, 1998). Pero ¿qué hace que, como señala Gómez-Granell y Coll (1994), decir constructivismo es como no decir nada? Estos mismos autores responden señalando que “la diversidad de enfoques y propuestas que se auto-definen como constructivistas hacen que el constructivismo cumpla con cierta función de *comodín* dentro del cual cabe casi todo...”.

En una apretada síntesis, se presentan (Figura 1.9) las características del constructivismo radical de acuerdo a Von Glasersfeld (1989), por ser el que asumimos y, además, las características correspondientes a los paradigmas educacionales a través de las metáforas que las distinguen de acuerdo a Ernest (1993) (Figura 1.10).

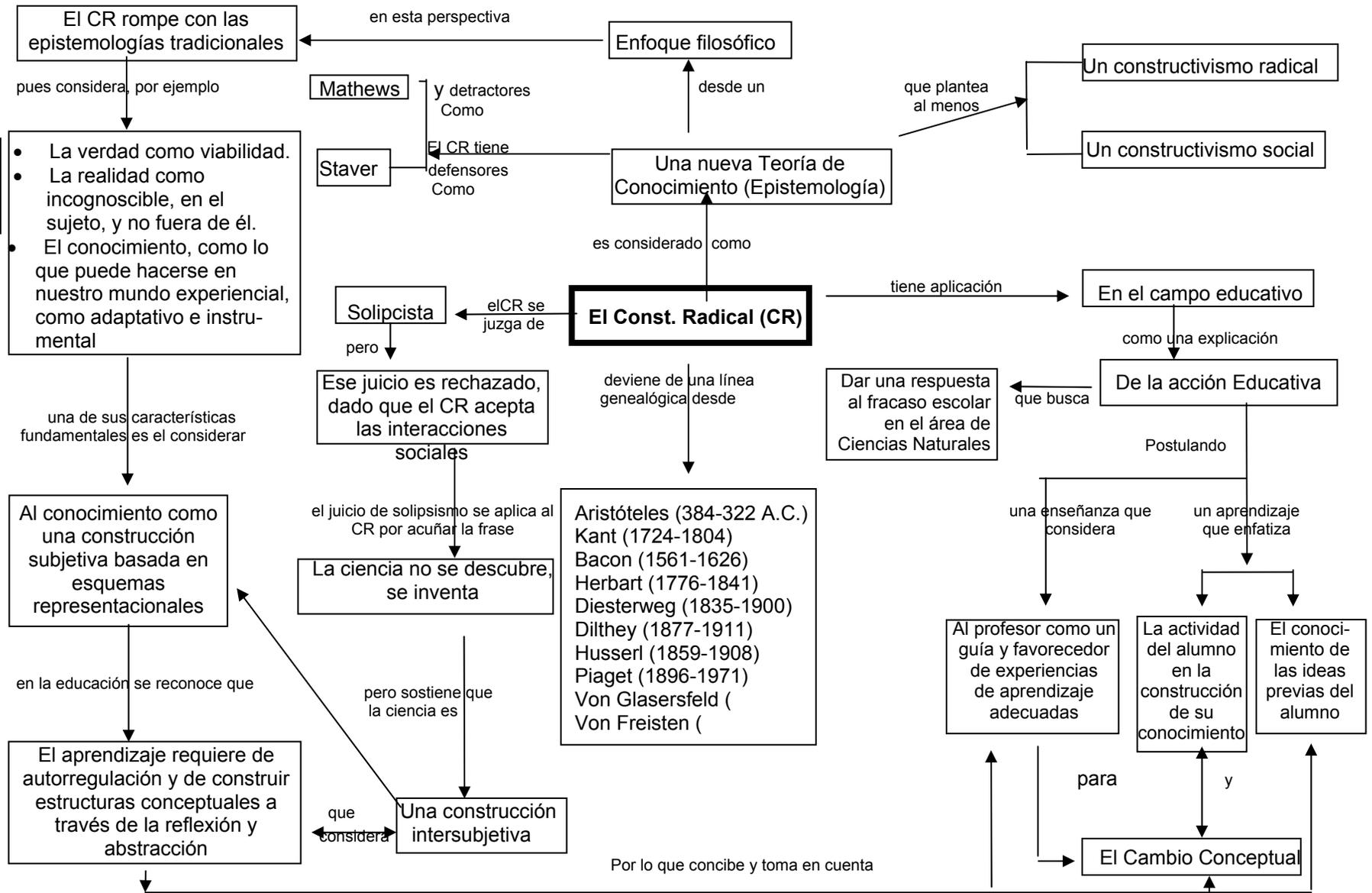


Figura 1.9 El Constructivismo Radical (CR)

METÁFORA	EMPIRISMO TRADICIONAL (ET)	TEORÍA DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN (TPI) FORMA MÁS SIMPLE DE CONSTRUCTIVISMO	CONSTRUCTIVISMO TRIVIAL (CT)	COGNICIÓN SOCIOCULTURAL	CONSTRUCTIVISMO RADICAL	CONSTRUCTIVISMO SOCIAL	CONSTRUCCIONISMO SOCIAL
Mente	Tabula rasa que se llena con imprecisiones o razonamientos.	Como computador Software.	Como computador Software.	Como estrategia. Admite interacciones sociales y el contexto socio-cultural es importante.	Para la sobrevivencia del organismo, la mente cambia, se ajusta y acomoda.	Personas en conversación en interacción lingüística y extra lingüística. No existe metáfora para la mente individual	Diálogo. Actores en un drama. Dimensión social introyectada con el individuo.
Mundo	En un proceso físico absoluto (newtoniano) donde los objetos materiales se posicionan y mueven.	En un proceso físico absoluto (newtoniano) donde los objetos materiales se posicionan y mueven.	En un proceso físico absoluto (newtoniano) donde los objetos materiales se posicionan y mueven.	Añade a ET la sociedad humana. El mundo es Incognoscible.	Mundo exponencial, contenido por las experiencias. El mundo es Incognoscible.	Espacio físico newtoniano pero incluye la sociedad humana. El mundo es socialmente construido.	Realidad social.
Enfoque humano.	Individual	Sólo individual.	Sólo individual.	Social e individual.	Sólo individual.	Social e individual.	Sólo social.
Teoría de verdad y conocimiento.	Teoría de correspondencia. El conocimiento es una representación descripción, verdad del mundo.	Teoría de correspondencia. El conocimiento es una representación descripción, verdad del mundo.	Teoría de correspondencia. El conocimiento es una representación descripción, verdad del mundo.	Teoría de correspondencia. El conocimiento es una representación descripción, verdad del mundo.	Unidad como coherencia y variabilidad. Todo conocimiento es construido por el sujeto con base en procesos cognitivos en diálogo con su mundo experiencial.	Sólo individual. Unidad construida socialmente.	Sólo individual. Unidad construida socialmente.
Ontología	Realismo, ingenio: El mundo de cosas que experimentamos existen y son parte de la realidad.	Realismo, ingenio: El mundo de cosas que experimentamos existen y son parte de la realidad.	Realismo, ingenio: El mundo de cosas que experimentamos existen y son parte de la realidad.	La realidad es cognoscible.	Neutral	Realista pero la realidad es cognoscible. El conocimiento convencional es el que vivido y socialmente aceptado.	Universo de personas residiendo en el mundo.
Epistemología.	Objetivista. El conocimiento del mundo es posible. Absolutista.	Objetivista. El conocimiento del mundo es posible. Absolutista.	Todo conocimiento individual es construido para ajustarse al mundo		Escéptica antiobjetivista falibilista.	No absolutista, no objetivista. Falibilista.	Falibilista.
Enseñanza	Transmisiva.	Construcción de significados.	Favorecer el conocimiento de las ideas previas. Cambio conceptual.	Sigue a Vigotsky y en desarrollo próximo.	Favorece el cambio conceptual.	Favorece el conocimiento cultural. El profesor como facilitador, creador de condiciones para resolución de conflictos, promotor hacia significados socialmente aceptados.	
Teoría de Aprendizaje.	El conocimiento está listo para ser recibido por un aprendiz pasivo y receptivo.	El conocimiento involucra procesos mentales activos. Está basado en los conocimientos previos.	Cambio conceptual.	El aprendiz cercano al experto. Aprende bajo su tutela.	El aprendiz crea esquemas cognitivos para guiar su acción y representar sus experiencias	Reconoce la existencia de objetivos y metas en el aprendiz. Enfatiza el papel del lenguaje y de la interacción social.	
Pedagogía	El estudiante comete errores y misconcepciones por falta de aplicación y memorización	El estudiante comete errores y misconcepciones por falta de aplicación y memorización. El conocimiento no se recibe pasivamente es construido activamente.	El estudiante comete errores y misconcepciones por falta de aplicación y memorización. El conocimiento no se recibe pasivamente es construido activamente.	Se acepta al novicio hasta que logra maestría. Es ecléctica.	Multifacética, sensible a la construcción individual. El conocimiento no se recibe pasivamente, es construido activamente.	Admite la práctica periférica del novicio, permitiendo aumentar en participación conforme desarrolla maestría. Es ecléctica.	Poco desarrollada. Enfocada hacia la terapia psicológica.
Paradigma de Investigación.	Neopositivista.	Neopositivista.	Neopositivista. Paradigma Local. Solo toma en cuenta para el conocimiento, las representaciones individuales.	Neopositivista.	Interpretativo Constructivista.	Interpretativo Constructivista	Interpretativo Constructivista

**FIGURA 1.10 Paradigmas educacionales y sus metáforas.**

Pese a las críticas<sup>11</sup> a la teoría constructivista radical de Von Glasersfeld, Mathews (1992) y Osborne (1996) elogian la llamada “Pedagogía Constructivista” y reconocen el valor del constructivismo para una pedagogía de la ciencia, de la cual se desprenden líneas de

<sup>11</sup> Se alude al solipsismo y a la suposición de que el constructivismo radical ataca la práctica científica, a ello Staver (1998) responde afirmando que el constructivismo radical sí acepta que la ciencia es una construcción intersubjetiva y precisa que no se ataca la práctica de los científicos sino sus deseos.

investigación y modelos de aprendizaje y enseñanza alrededor de los términos: concepciones alternativas (ideas previas o preconcepciones), cambio conceptual y aprendizaje cooperativo.

### *1.2.2.3 Dimensiones Histórica, Epistemológica y de Enseñanza*

Para el análisis de los resultados obtenidos de la indagación de la concepción, enseñanza y evaluación de la entropía en los difusores-profesores, proponemos atender las dimensiones histórica, epistemológica y de enseñanza. La primera se enlaza con el seguimiento diacrónico para la entropía; la segunda, se vincula con las posturas filosóficas planteadas en nuestro marco teórico, mismas que son utilizadas a lo largo de todo el estudio y la tercera, se relaciona con las características de la enseñanza.

En la dimensión histórica se proponen como modelos básicos de ubicación del conocimiento disciplinario de los profesores, a los modelos de los constructores: Clausius y Boltzmann. En la dimensión epistemológica las categorías propias de las tradiciones lógico-empirista y de la nueva filosofía, permitirán identificar en los profesores la aproximación de su enseñanza hacia una u otra postura. En la dimensión de enseñanza se planteará el enfoque predominante en cada profesor a partir de su acercamiento a las llamadas enseñanza tradicional y a la enseñanza activa apoyada en el constructivismo. Las categorías analíticas para cada dimensión se presentan en el Capítulo 4.

### *1.2.2.4 Perfil Epistemológico y Matriz Disciplinaria*

Como se ha expresado, las representaciones de los profesores serán interpretadas a partir del Perfil Epistemológico de Bachelard (1968) y los elementos para una propuesta de enseñanza para la entropía, se estructurará con base en los componentes de la Matriz Disciplinaria de Kuhn (Posdata, 1975).

La noción de Perfil - sea el epistemológico de Bachelard, publicado en 1940 o el conceptual de Mortimer, basado en aquel y propuesto en 1995- junto con otros trabajos<sup>12</sup>, introduce al campo educativo la “multirrepresentacionalidad” es decir el reconocimiento de la existencia en los sujetos de la representación múltiple para conceptos de la ciencia (Flores, 2004). Esta

---

<sup>12</sup> Se alude a Caravita y Hallden (1994) citado por Flores (2004).

nueva perspectiva ha demostrado ser un campo de investigación fructífero pues describe en distintas temáticas cómo los sujetos mantienen y usan diferentes representaciones (Gallegos, 2002; Pozo, Gómez y Sanz, 1999).

Por otro lado, pasando al contenido, la matriz disciplinaria de Kuhn (Posdata, 1971), presenta los componentes del contenido científico que conforma una disciplina y, por lo mismo, constituye una guía para seleccionar el contenido de la enseñanza. Tal contenido, de acuerdo a Kuhn, está compuesto de cuatro componentes: A generalizaciones lógico-simbólicas; B creencias en modelos; C valores compartidos; D ejemplares o conjunto de soluciones concretas a problemas.

Los cuatro componentes se distinguen en *los sujetos de la termodinámica* que intervienen en nuestra propuesta de desarrollo de esta investigación: *los constructores, continuadores y difusores*. De ellos, son los *constructores* quienes, como fundadores de paradigma, sientan las bases del mismo en cada componente, esto es: determinan las generalizaciones lógico-simbólicas, los contenidos conceptuales, los modelos, los valores y los límites del paradigma; los *continuadores* los complementan amplían y fortalecen y, los *difusores* los asumen y conocen para difundirlos y enseñarlos.

### **1.3 Objetivos y planteamiento de la investigación**

A partir del estudio de Brosseau-Viard (1992), se construye el problema que se plantea en esta investigación relacionado con la comprensión del concepto de entropía pero, además, relacionado con la búsqueda de una explicación para la pérdida de la expresión original de Clausius y la componente cinética de esa expresión, y con las repercusiones que esa pérdida ha podido generar en la enseñanza y aprendizaje del concepto. Algunas de esas repercusiones, postulamos, se evidencian en las múltiples representaciones para la entropía que manifiestan los autores de los libros de texto y los profesores.

El acercamiento al problema, si se plantea a través de interrogantes, requiere, en primera instancia, que se encuentre una explicación para las preguntas:

- ¿Por qué el concepto de entropía que se maneja escolarmente no se corresponde con el original de Rudolph Clausius?
- ¿Por qué se perdió uno de los significados otorgados por Clausius a la entropía?
- ¿Qué implicaciones puede ello tener para el desarrollo del concepto y su enseñanza?

Y como objetivos generales en esta investigación se busca:

1. Contribuir al esclarecimiento y comprensión del concepto de entropía a partir del seguimiento de la evolución del concepto desde su planteamiento original con Clausius hasta la época actual
2. Esclarecer la pérdida de la expresión original de Clausius
3. Identificar y explicar algunas repercusiones de esa pérdida
4. Indagar las implicaciones de la expresión original de Clausius en la enseñanza del concepto de entropía
5. Estructurar algunos elementos teóricos que contribuyan a mejorar la enseñanza del concepto de entropía

El desarrollo de la investigación se organizará a por medio de dos vertientes: una de carácter histórico-interpretativo, y la segunda, de carácter educativo. Para el logro de los objetivos generales es necesario el planteamiento de los objetivos particulares siguientes.

Para la Vertiente Histórica (objetivos 1,2 y 3)

- Indagar y verificar la expresión original del concepto de la entropía con Clausius
- Indagar el concepto de entropía con Boltzmann
- Indagar el devenir del desarrollo de la entropía en otros científicos

Para la Vertiente Educativa (objetivos 4 y 5)

- Identificar las definiciones, presentaciones y desarrollos para la entropía que aparecen en los libros de texto.
- Identificar las definiciones, y representaciones para la entropía que sustentan los profesores de termodinámica.

- Plantear elementos que permitan estructurar alternativas para la enseñanza de la entropía.

En el desarrollo de esta investigación, los elementos del marco teórico se aplicarán en el lugar que corresponda, conforme al planteamiento metodológico que se ha propuesto enfocado al estudio de los “sujetos de la termodinámica” *los constructores, los continuadores y los difusores*.

Así, procedimentalmente:

1. Se seguirá el desarrollo de la Segunda Ley y la entropía en términos del señalamiento de las diferencias entre los planteamientos originales y los posteriores.
2. Se marcarán, los cambios que sufran los planteamientos originales al ser interpretados por los sucesivos estudiosos de la Segunda Ley y la entropía, a partir de nociones acordes a nuestro marco teórico.
3. Se identificará el enfoque histórico predominante en la presentación y desarrollo del concepto de entropía en una muestra de libros de texto de termodinámica.
4. De manera análoga al punto anterior, se identificará el enfoque predominante en la presentación y desarrollo del concepto de entropía en una muestra de profesores de termodinámica del nivel superior.
5. Se identificarán e interpretarán las definiciones y las representaciones de los profesores. Y, con base en esta información:
6. Se estructurarán, desde el constructivismo y otras nociones teóricas, elementos para la enseñanza de la entropía.

La indagación de los aspectos mencionados y otros adicionales constituirán el contenido de este trabajo con el que se busca contribuir al esclarecimiento y comprensión de la entropía a partir del seguimiento de la evolución del concepto desde su planteamiento original con Clausius hasta la época reciente, con sus continuadores y sus difusores.

En el siguiente Capítulo, damos cuenta de la vertiente histórica y de los objetivos 1, 2, y 3. En él se analiza el trabajo de los constructores y de los continuadores.

## VERTIENTE HISTÓRICA. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA

### CAPÍTULO 2. ORIGEN Y DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA. LOS CONSTRUCTORES. LOS CONTINUADORES

#### 2.1 Los Constructores: Clausius

Brosseau y Viard (1992), repetimos brevemente, llaman la atención sobre el planteamiento original de la entropía debido a Clausius en el que afirman, la entropía esta constituida por dos elementos que denominan entropía cinética y entropía espacial. Tal planteamiento, señalan, ha sido dejado de lado si no olvidado en nuestros días, situación que, desde su perspectiva ha empobrecido el concepto y confundido su comprensión lo que, consideran ha tenido como reflejo una enseñanza y aprendizaje, por decir lo menos, incompleto.

La situación descrita ha sido tomada por nosotros como un problema a ser investigado y su confirmación o refutación constituye una parte substancial del trabajo que nos ocupa.

Como ya se mencionó, el examen histórico será el punto de inicio obligado, por lo que, un resumen de las Memorias VI (1862) y de las Memorias X (1865) de Clausius en sus puntos medulares relacionados con nuestro interés, se presenta en el Anexo I.

Antes aclaramos que, ubicados dentro de nuestro marco teórico, en este recorrido analítico haremos uso de la noción de significatividad tanto en su distinción **conceptual** como **perceptual** y se asume la concepción de disciplina como un tejido o trama conforme la metáfora Hempel-Brown.

Por otro lado, dada la índole creativo-germinal del trabajo de Clausius, nos situamos naturalmente en el contexto de descubrimiento pero rechazamos la “tajante separación” popperiana con el contexto de justificación pues, consideramos con Brown (1998, p. 169) que

están relacionados y que “no puede trazarse ninguna línea tajante entre descubrimiento y justificación”.

Para aproximarnos al trabajo de Clausius (y a los trabajos de sus continuadores y los difusores -autores de texto-, que revisaremos después), hemos decidido enfocarnos al examen, cuando sea posible, de los puntos siguientes: 1) necesidad a la que responde o vacíos conceptuales que se pretende(n) llenar con cada trabajo, 2) el problema, pregunta o propósito que se persigue o busca(n) resolver; 3) la descripción y/o definición del concepto, ley... construido, desarrollado, ampliado o difundido; 4) las estrategias de desarrollo con los apoyos matemáticos elegidos y 5) la explicitación de la 2ª ley y/o de la entropía.

Los puntos descritos, responden a la intención de obtener información que nos permita rastrear la significación original de la entropía y de sus componentes. Esta información será el punto de referencia para la exploración de los desarrollos posteriores.

Si bien en la Memoria VI Clausius presenta el desarrollo matemático del que se desprende y nombra en la Memoria IX, el concepto de entropía (Anexo 1.1), se requiere resaltar aquí, por un lado, el problema al que responde ese desarrollo y por el otro el sentido físico de tal concepto.

Clausius se ubica en una etapa histórica posterior a los trabajos de Carnot (1796, 1832) y los trabajos de otros contemporáneos<sup>13</sup>, lo que le permite apreciar globalmente y aprovechar los logros y avances ya realizados en el campo de la “mecánica del calor”, como se la conocía entonces.

El concepto de entropía aparece con Clausius, como parte del razonamiento con el que se enfrenta al problema de encontrar una expresión matemática con la cual expresar todas las transformaciones que sufre un cuerpo<sup>14</sup>, ante un intercambio (transmisión) de calor entre ese cuerpo y otro cuerpo o de ese cuerpo con el exterior y viceversa.

---

<sup>13</sup> Como ejemplos: Thomson, W (1824-1907), Maxwell, J (1831-1879)

<sup>14</sup> En los diferentes trabajos que analizaremos, se respetará la notación que cada uno siga. No sustituiremos entonces ni cuerpo por sistema ni exterior por alrededores.

Desde luego el problema señalado, conduce a entender que, (hasta Clausius), no se había atacado tal problema y que había un vacío en el conocimiento de los cambios que se generaban en los fenómenos de intercambio de calor.

La noción de “significatividad perceptual”, explica porque Clausius fue capaz de observar lo que estaba ante los ojos de todos sus contemporáneos y sólo él, con la “mirada cargada de teoría,” pudo identificar el fenómeno para percibirlo, “verlo como” un vacío en la teoría y “significarlo” como problema.

La claridad de exposición<sup>15</sup> de este autor, permite hacer el seguimiento del razonamiento general, (con las inevitables licencias de interpretación), en la resolución al problema que se planteó resolver y como del mismo, “extrae” el concepto de entropía.

En el razonamiento, Clausius toma como antecedentes los estudios de Carnot en relación con los ciclos de máquinas térmicas, el principio de conservación de la energía y el principio de equivalencia de las transformaciones de energía. De hecho, en el propio título del trabajo presentado ante la Sociedad de Ciencias Naturales de Zurich en 1862: “Sobre la Aplicación del Principio de Equivalencia de las Transformaciones al Trabajo Interior”, Clausius anuncia desde allí, el desarrollo que siguió.

Efectivamente, parte del principio de equivalencia entre el trabajo y el calor, es decir, “el trabajo puede transformarse en calor y recíprocamente” y del axioma que expresa que “el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a uno caliente”.

Clausius entiende por transformación [de un cuerpo] a toda transmisión de calor. Así, en la consideración de un cuerpo cuando realiza un ciclo cerrado, en el que se puede ganar o perder calor equivalentemente, se plantea todas las transformaciones que pueden originarse, a saber: aquellas en las que fuerzas exteriores realizan trabajo sobre el cuerpo (trabajo exterior) transformando trabajo en calor ganado por el cuerpo ( $Q$  positivo), o aquellas otras en las que el calor del cuerpo realiza trabajo venciendo resistencias (fuerzas externas) y

---

<sup>15</sup> No atenderemos aquí las críticas que expone Truesdell (1973) en su obra porque las consideramos más en el terreno del uso, riguroso o no, de la herramienta matemática que se empleó. A nosotros nos interesa el razonamiento físico-conceptual.

perdiendo calor en el proceso ( $Q$  negativo) y, por último, aquellas transformaciones que resultan del intercambio de calor (transmisión) de un cuerpo a otro.

Es importante, que se enfatice que Clausius considera como transformaciones equivalentes a aquellas que pueden reemplazarse mutuamente y que, la expresión matemática  $Q/T$ , es equivalente a la cantidad<sup>16</sup> de calor  $Q$ , a la temperatura  $T$ , producida por trabajo (exterior). Es precisamente a partir del trabajo exterior y de las transformaciones de transmisión que Clausius llega a la deducción de su desigualdad.

Centrado en el trabajo interior, la pregunta a contestar, el problema a resolver por el autor es: “¿cuáles son los fenómenos por medio de los cuales el calor contenido en un cuerpo (al que llama “H”) puede producir trabajo mecánico?”.

La respuesta–solución que da Clausius es sencilla: el trabajo lo realiza el calor a costa de que se modifique el arreglo de las partículas que constituyen el cuerpo, lo que exige señala Clausius, que se superen o venzan tanto las resistencias (fuerzas) exteriores como las interiores (relacionadas con la cohesión de las partículas del cuerpo).

Tal razonamiento hace que sea necesario introducir el término “disgregación” para denotar el arreglo de las partículas o el “grado de división de los cuerpos” como le llama Clausius, representándola con la letra  $Z$ . De esta manera, dice, “la acción del calor tiende siempre a disminuir la cohesión de las moléculas y cuando es superada acrecienta sus distancias medias” esto es, aumenta la “disgregación” del cuerpo.

Así, continuamos citando, “el trabajo mecánico que el calor puede efectuar durante una modificación del arreglo de un cuerpo, es proporcional a la temperatura” porque, afirma Clausius, “es evidente que la producción de trabajo necesita consumir una cantidad correspondiente de calor” (y recíprocamente).

---

<sup>16</sup> Nótese que Clausius maneja la noción del calor como substancia, manteniendo una concepción dual: la concepción de calórico y la del calor como movimiento de partículas

Con lo expuesto, Clausius plantea la respuesta al problema inicial de encontrar una expresión matemática para las transformaciones que sufre un cuerpo ante un fenómeno de transmisión de calor; a saber:

El calor cedido por un cuerpo ( $-dQ$ ), es equivalente a la variación del calor que contenga el cuerpo ( $dH$ ), más el trabajo ( $dL$ ) que realice el calor durante la modificación en el arreglo de las partículas del cuerpo.

Matemáticamente:

$$(a) \quad -dQ = dH + dL \quad \text{donde } dL = KTdZ \quad dH \text{ es la variación de calor.}$$

El desarrollo completo se presenta en el Anexo 1 y con él, se llega a la expresión:

$$\int ((dQ + dH) / T) + \int dZ = 0 \quad (1)$$

que es el principio de equivalencia de las transformaciones.

Importa resaltar que en este principio existe ya el germen de la entropía, o la entropía misma, pero sin que Clausius la destaque todavía como tal.

Es en la Memoria IX (1865) donde, mediante algunas manipulaciones algebraicas en la fórmula 1, le da nombre a la entropía y la representa con una  $S$ .

Matemáticamente:

$$dS = dQ/T$$

$$S = S_0 + \int dQ / T$$

$$\int dQ/T = \int dH / T + \int dZ = Y + Z$$

donde  $Y$  y  $Z$  son los dos componentes de la entropía

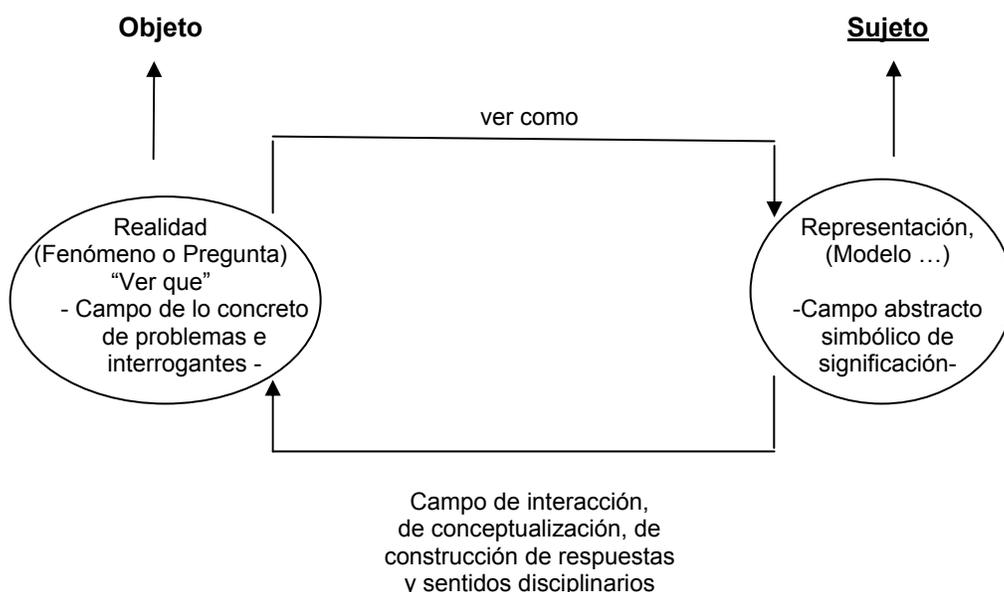
Esta es la expresión de Clausius para la entropía en la que se aprecian los dos componentes que Brosseau y Viard (1992) mencionan en su artículo.

El razonamiento de Clausius es un ejemplo de un pensamiento guiado por las reglas del método inductivo-deductivo mismo que, analizado desde nuestro marco teórico, permite entender la introducción de nuevas nociones, como la noción de *disgregación* que introduce,

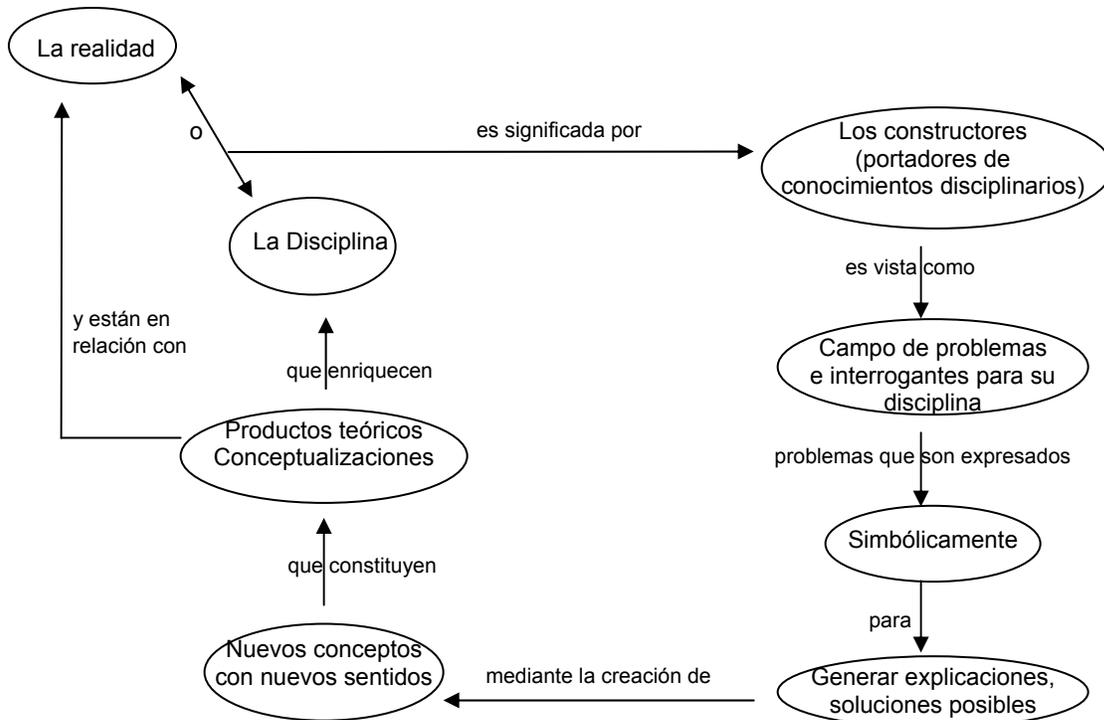
(más allá de la necesidad matemática surgida de su propio desarrollo), a partir de la asunción de que los cuerpos están constituidos por partículas (moléculas), esto es, de **la aceptación de la teoría corpuscular de la materia**.

Con este presupuesto o carga teórica, Clausius “*ve que*” existe un arreglo de partículas específicas para cada cuerpo que no ha sido tomado en cuenta, lo que percibe o “*ve como*” un vacío conceptual en la teoría por lo que crea un nuevo concepto “un nuevo nudo” en la trama disciplinaria, al llamar “disgregación” al grado de división de los cuerpos.

La significación perceptual (percepción con carga teórica) posibilita el cambio del “*ver que*” al “*ver como*” y da lugar a lo que hemos llamado un “campo de conceptualización” al interior del sujeto en el que sus conocimientos previos (presupuestos, conceptos, principios, leyes, teorías...) se relacionan e interaccionan con sus nuevas conjeturas e hipótesis eliminando, modificando y/o añadiendo hilos y nudos a la trama, al crear o construir nuevas significaciones y sentidos disciplinarios, como se esquematiza en las Figuras 2.1 y 2.2.



**FIGURA 2.1 Campo de Conceptualización en el sujeto**



**FIGURA 2.2 Percepción significada de los Constructores: Relación: Realidad – Disciplina**

La construcción del concepto de entropía, como tal, no aparece en Clausius o al menos no la da a conocer sino hasta tres años después de haber presentado la ecuación 1 con la que expresa matemáticamente todas las transformaciones que un cuerpo puede sufrir en procesos de intercambio de calor.

La demora puede explicarse sea por los múltiples intereses que le ocupaban (estudios sobre la capacidad calorífica, el calor específico...) y/o sea por su reluctancia a publicar los resultados de sus trabajos sin mediar un examen “más cuidadoso”, actitud que pone de manifiesto cuando justifica en la Memoire VI, su retraso en la publicación del principio de equivalencia de las transformaciones:

“He retrasado hasta ahora la publicación de la otra parte [se refiere al principio de equivalencia de las transformaciones] de mi principio [alude al principio de que el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a otro cuerpo más caliente] porque parece conducir a una consecuencia que se aleja notablemente de las ideas admitidas sobre la cantidad de calor contenida en los cuerpos; he creído mejor someterlo a un examen de mayor profundidad. Como me he convencido más y más a lo largo de los años que no se debe atribuir demasiada importancia a aquellas ideas que reposan

más bien en el hábito que sobre una base científica, creo poder no dudar más y someto a los eruditos el principio de equivalencia de las transformaciones y los teoremas que con él se relacionan. Yo espero que la importancia que tendrán los teoremas, si son exactos, para la teoría del calor, justificará la publicación bajo la forma hipotética actual” (Clausius, p 253)

Del párrafo citado, se puede desprender que Clausius retrasa la publicación de lo que llama “Principio de equivalencia de las transformaciones”, porque “lo somete a un examen de mayor profundidad”, lo que conduce a concluir que ese principio ya lo había deducido<sup>17</sup> desde 1854, (seis años antes), pero se había abstenido de darlo a conocer hasta no haberlo examinado a fondo. Desde luego, tiene que aceptarse que con Clausius, el nacimiento de la Entropía pasa por las etapas de: a) deducción del principio general de equivalencias de las transformaciones a partir del axioma mencionado (1854); b) periodo de esclarecimiento y examen a profundidad del mismo (1854-1862); c) simbolización del principio con la expresión matemática 1, publicada en 1862; d) segundo periodo de reflexión (1862-1865); e) generalización de la relación matemática 1 para todo proceso e introducción del concepto de entropía bajo ese nombre (1865).

Examinadas las etapas descritas desde nuestras nociones analíticas, en la etapa a), la *significación perceptual* posibilita que Clausius, desde 1854, perciba la necesidad de estudiar el trabajo exterior y el trabajo interior que “se efectúa simultáneamente en todo cambio de estado de un cuerpo” (Clausius p 252); la *significación disciplinaria* permite a su vez, percibir las relaciones entre conceptos y principios, ya existentes, con otras propuestas y construir o crear nuevos conceptos; principios, leyes... e incrementar la trama o paradigma disciplinario, construcción que es lograda en las etapas b) y d) de reflexión-conceptualización. Por último las etapas de formalización-simbolización o búsqueda de expresiones matemáticas como la c) y la e) son de recapitulación y presentación abreviada de los resultados de los razonamientos y desarrollos elaborados.

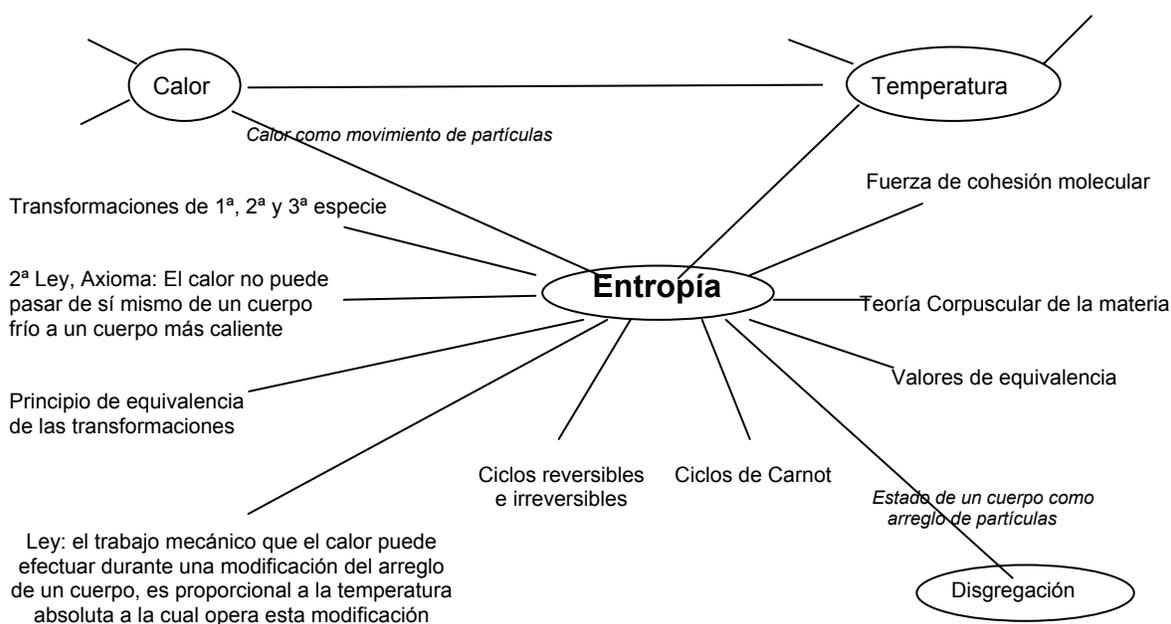
Examinando más cercanamente el origen del concepto de entropía, salta de nuevo la pregunta ¿Porqué Clausius presenta y nombra como tal a la entropía tres años después de la publicación de la expresión 1? Desde nuestro marco, consideramos que en 1862 el *sentido disciplinario* de la entropía aún no había sido completado.

<sup>17</sup> De hecho así es, como lo menciona explícitamente en la p 252, “... yo había deducido un principio ligado estrechamente con lo que Carnot había extraído de otras consideraciones...”

Conviene recordar aquí que estamos considerando el sentido disciplinario como aquel que se desprende **de la posición que ocupa el concepto dentro de la trama disciplinaria** a la que pertenece. Como ya se ha dicho, la creación de un concepto surge como respuesta a una pregunta-problema que el creador-constructor *percibe* y *significa* como una necesidad a ser cubierta.

La entropía, como cualquier otro concepto, tiene que ser colocada en el lugar que le corresponde y estar sostenida por la solidez de las suposiciones, principios, leyes,...(que constituyen los hilos, en nuestra metáfora de trama disciplinaria) y por las relaciones que se construyen con los hilos y con los otros conceptos-nudos ya existentes en la trama con los que el nuevo concepto interacciona. (Figura 2.3)

La construcción del *sentido de un concepto nuevo* corre a cargo de quien lo propone, por lo que en su publicación, está la aceptación de someterlo “al juicio de los eruditos” (Clausius p. 253), no extraña entonces que la publicación se realice hasta que el autor tenga la seguridad y la confianza en los desarrollos y razonamientos que presenta y en el sentido disciplinario que construye para el concepto.



**FIGURA 2.3 El Concepto de Entropía de Clausius como Nudo en la Trama Disciplinaria**

Clausius publica en 1862, el principio de equivalencia bajo la expresión matemática 1:

$$\int (dQ + dH)/T + \int dZ = 0 \quad (1)$$

que es deducida y es válida sólo para procesos reversibles, para los que se cumple la ecuación:

$$\int dQ / T = 0 \quad (1a)$$

pero para todo ciclo cerrado posible se tiene que

$$\int dQ / T \geq 0 \quad (1b)$$

por lo que generalizando la expresión 1, se cumple que

$$\int (dQ + dH)/T + \int dZ \geq 0 \quad \text{Expresión válida para todo proceso}$$

esto es, “la suma algebraica de todas las transformaciones que se efectúan en todo cambio de estado sólo puede ser positiva o en el límite, puede ser nula”.

### 2.1.1 Memoria IX de Clausius (1865). Presentación del Concepto de Entropía

Clausius inicia la Memoria IX (1865) con las siguientes palabras:

“ En mis Memorias anteriores sobre la teoría mecánica del calor, yo tenía como objetivo darle una base segura y busqué poner, bajo su forma más simple, y al mismo tiempo más general, el segundo principio fundamental bastante más difícil de asir que el primero ...” (Memoria IX p. 377).

En la misma página anuncia que el propósito del trabajo que se reporta en la Memoria IX, es el de “deducir diversas otras formas de las ecuaciones fundamentales de la Teoría Mecánica del Calor que sean más cómodas en su aplicación”. Así pues, es bajo este propósito que Clausius se ocupa otra vez del segundo principio, tomando en consideración las modificaciones no reversibles, en lo que llama “investigaciones matemáticas” (Clausius, Memoria IX p 407). Para ello resalta por un lado, que las cantidades de calor que se deben comunicar o extraer a un cuerpo, no son las mismas en procesos reversibles e irreversibles. Por otro lado, resalta que toda modificación no reversible “está ligada a una **transformación no compensada** cuyo conocimiento es importante”.

La **transformación no compensada** se relaciona con el segundo principio y, señala Clausius, está contenida en la ecuación (1b) misma que es nula en procesos reversibles.

La **expresión  $dQ/T$** , integrando de (1a), debe ser siguiendo a Clausius, la diferencial total de una cantidad que sólo depende del estado actual del cuerpo y no de la vía por la cual se llega a él. Esa cantidad la representa por la letra S, y se tiene que:

$$dS = dQ/T$$

o introducida en la relación (1):

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ \quad (1)$$

$$S - S_0 = \int dH/T + \int dZ \quad (1c)$$

donde H, representa la cantidad de calor realmente existente en el cuerpo y sólo depende de la temperatura.

$dH/T$  es también una diferencial total para la que, - al tomar su integral a partir de un estado inicial dado (para  $T \neq 0$ ) hasta el estado actual-, se obtiene una cantidad que está determinada sólo por el estado actual. Clausius nombra a esta cantidad “el valor de transformación del calor de un cuerpo contado a partir de un estado inicial dado” y lo representa por Y.

A su vez en la integral  $\int dZ$ , Z es la disgregación del cuerpo que depende del arreglo de las partículas. “Se puede decir que la disgregación es el valor de transformación del arreglo actual de las partículas del cuerpo” (Memoria IX, p 410).

La entropía S, aparece entonces ligada a “una investigación matemática” que Clausius realiza para “deducir” (Memoria IX p 378) otras expresiones que se relacionen con las planteadas originalmente. Sin embargo, no podría afirmarse que S es sólo una consecuencia de un razonamiento matemático. Al razonamiento matemático le **antecede el razonamiento físico**, el **sentido disciplinario** ya construido y presente en el autor.

Clausius desde 1862, tenía claro que en los cambios de estado no reversibles, la expresión  $\int dQ/T$  era diferente de cero (expresión 1b), pero es en 1865 cuando la publica y la vincula a “una transformación no compensada”, es decir:

$$\int dQ/T \geq 0 \quad (1b)$$

o dado que  $\int dQ/T = S - S_0$

$$S - S_0 \geq 0$$

$$S \geq S_0$$

Expresada en palabras, en cambios de estado no reversibles, la entropía del estado final es mayor (o igual en los cambios reversibles), que la entropía del estado inicial. Esta es una consecuencia matemática que se corresponde con las observaciones fenoménicas y con el sentido físico – disciplinario construido por Clausius dentro de la Teoría Mecánica del Calor.

### 2.1.1.1 El Sentido Físico – Disciplinario construido por Clausius

A partir de una *percepción significada*, cargada de teoría, Clausius distingue y se plantea como problema el dar respuesta a ¿que ocurre (fenómeno ligado con la realidad) en un cuerpo cuando en un cierto estado recibe o cede calor?

Con base en sus conocimientos previos y resultados de *conceptualizaciones* anteriores:

Primero: establece y parte de ciertos supuestos como: el principio de equivalencia de las transformaciones, su segundo principio (axioma) relacionado con la dirección del intercambio espontáneo de calor entre dos cuerpos con temperaturas diferentes, la teoría corpuscular de la materia y el calor como movimiento de partículas...

Segundo: enfoca su atención en el trabajo interior para un ciclo cerrado reversible

Con este bagaje, Clausius propone que el trabajo que el calor de un cuerpo puede efectuar (equivalente a  $Q/T$ ) se realizará a través de la modificación-transformación del arreglo de las partículas constituyentes del cuerpo ( $Z$ ) y de la modificación-transformación del calor existente en el cuerpo ( $H$ ).

Estas transformaciones, afirma, son todas las que un cuerpo puede sufrir y Clausius las nombra de primera, segunda y tercera especie. La primera transformación se refiere a aquella en la que el trabajo se transforma en calor y viceversa; la segunda es la que ocurre en fenómenos de transmisión de calor (que puede ser incluida en las de la primera especie y las de la tercera especie que se dan ante cambios del estado de agregación del cuerpo.

La expresión (1) recoge las transformaciones de primera y segunda especie en el término  $\int (dQ + dH)/T$  y las de tercera especie en el término  $\int dZ$ .

De hecho, la suma  $dQ + dH$  será (si es mayor que cero), la cantidad de calor producida por trabajo exterior y si es negativa (menor que cero), la cantidad de calor interno transformado en trabajo.

En los cambios reversibles la suma de todas las transformaciones se compensan una a la otra. No sucede así en los cambios no reversibles en los que, toda modificación está ligada a una **transformación no compensada: la entropía**.

Con el nombre escogido para este concepto Clausius trató de que fuera descriptivo en sí mismo y próximo al de energía, al respecto dice: “yo propongo llamar a la cantidad  $S$  la *entropía* del cuerpo tomando la palabra griega *τροπή*, “transformación”. El diseño que yo he formado con la palabra entropía lo hice de manera que se asemejara tanto como fuera posible a la palabra “energía”. (Memoria IX, p. 411).

Esta búsqueda de cercanía con la palabra que designa la entropía y la correspondiente a la energía es debida a la analogía entre ellas que Clausius, desde una *percepción significada* advierte, y con la que, *ve como* evidente la aproximación en su significación física de dos principios cuyo *sentido disciplinario* él mismo construye.

La analogía alude, en sus palabras, al:

“Conjunto de las diferentes cantidades sobre las que he estado tratando en esta Memoria (se refiere a la Memoria IX) y que han sido introducidos para la Teoría Mecánica del Calor y que han recibido una significación, estas cantidades que tienen todas en común que son determinadas por el estado actual del cuerpo sin que se tenga necesidad de saber de que manera se llegó a él, son seis en número: 1) *el contenido de calor*; 2) *el contenido de trabajo*; 3) la suma de estas dos cantidades o el contenido de calor y de trabajo o la *energía*; 4) *el valor de transformación* del contenido de calor; 5) *la disgregación*, que puede ser considerada como *el valor de transformación del arreglo actual* de las partículas; 6) la suma de las dos cantidades precedentes o *el contenido de transformación*, o la *entropía*. (Memoria IX, p 412)

En símbolos:

- 1) Q
- 2) W
- 3)  $U = Q + W$
- 4) Y
- 5) Z
- 6)  $S = Y + Z$

Esta analogía, tan clara para el autor en su *sentido físico-disciplinario* parece haberse ido dejando de lado.

Efectivamente, la entropía en el planteamiento original de Clausius **sí** consta de dos elementos: uno ligado sólo a la temperatura (Y) y el otro ligado solamente al arreglo de las partículas del cuerpo (la disgregación Z).

Brosseau y Viard nos han recordado este hecho; las implicaciones de ello y el seguimiento de su evolución desde nuestro marco teórico será el tema de lo que continúa y de los siguientes capítulos.

## **2.2. Los Constructores: Boltzmann**

Ludwig Boltzmann (1884-1906), fue el líder de un movimiento que en el siglo XIX buscó reducir los fenómenos de calor, luz, electricidad y magnetismo a “materia y movimiento”, esto es, a modelos corpusculares basados en la mecánica newtoniana. Una de sus contribuciones fue la de mostrar que la mecánica, que había sido vista como determinista y reversible en el tiempo, podía ser usada para describir fenómenos irreversibles del mundo real sobre una base probabilística.

Boltzmann (1964) decide publicar una versión reducida <sup>18</sup> de sus estudios en la cual explica las partes más importantes de la Teoría de Gases y sus propias contribuciones al campo. Sus “Conferencias sobre la teoría de los gases”, fue una referencia para los investigadores y un libro de texto utilizado por estudiantes durante el primer cuarto del siglo XX. La lectura de la obra de Boltzmann continúa siendo vigente más de un siglo después, porque casi todas las propiedades de los gases a temperaturas y densidades ordinarias pueden ser descritas por la teoría clásica, sin necesidad de utilizar la mecánica cuántica.

El trabajo de Boltzmann remata un periodo de actividad creciente en lo referente a estudios sobre fenómenos de calor. En los años de 1840 a 1855 como se sabe, Joule establece experimentalmente, la equivalencia entre el calor, trabajo y otras formas de energía. El principio de conservación de la energía fue formulado por Mayer, y Clausius establece el segundo principio de la termodinámica y la idea de la “trayectoria libre media” de una partícula entre colisiones sucesivas. Con base en este concepto, Maxwell, Clausius, y Mayer desarrollan posteriormente la teoría de difusión, viscosidad y la conducción del calor.

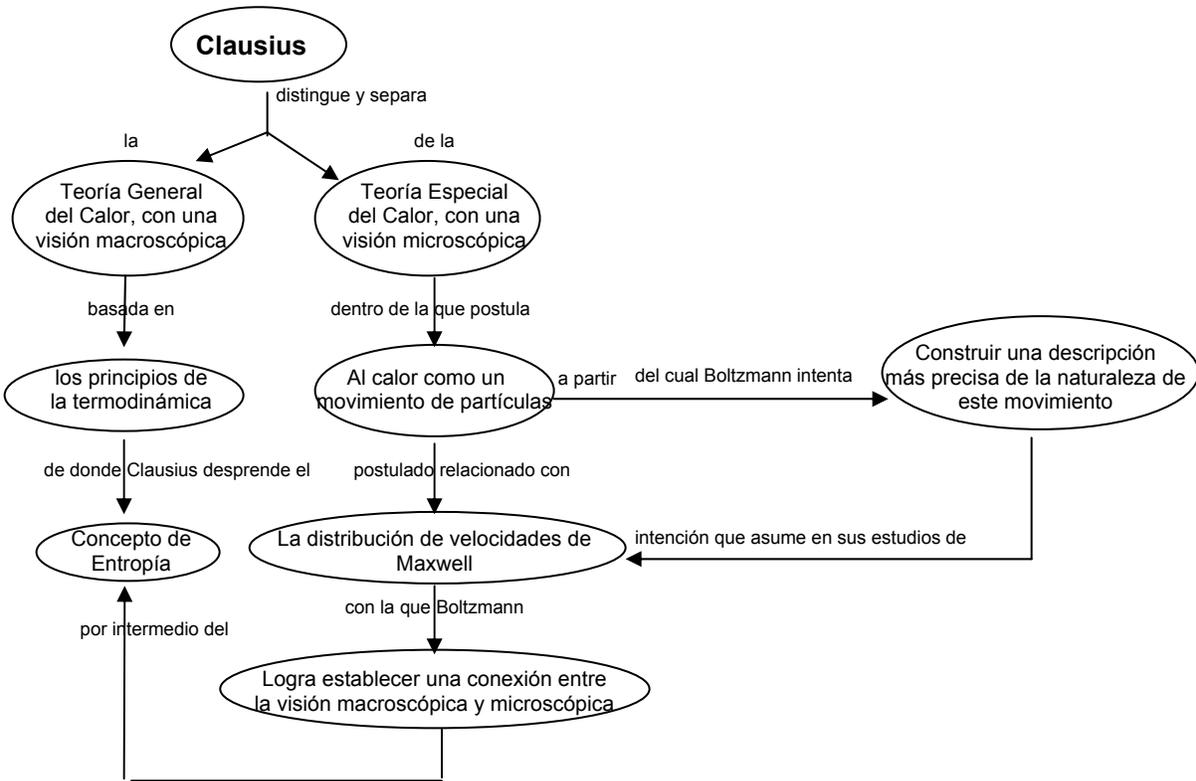
Clausius, al decir del propio Boltzmann, percibía con claridad que el calor podía ser estudiado tanto desde una perspectiva macroscópica, que llamó Teoría General del calor, como desde una perspectiva microscópica, a la que llamó Teoría Especial del calor. Su trabajo lo desarrolla fundamentalmente dentro de la Teoría General y desde allí, a partir de los principios ya conocidos, desprende la segunda Ley de la Termodinámica y el concepto de entropía.

Sin embargo, Clausius acepta que el calor es un movimiento de partículas y desde este postulado, calcula la trayectoria libre media que las partículas describen entre una colisión y la subsiguiente. Este cálculo lo ubica en la Teoría Especial, pero, es Boltzmann quien, haciendo uso de este concepto y de otros trabajos de Clausius y de Maxwell, se propone construir una descripción más precisa de la naturaleza del movimiento de las partículas microscópicas y con ello logra establecer una conexión entre las dos perspectivas a través de la entropía.

---

<sup>18</sup> Boltzman, L. (1964) Lectures on Gas Theory UC Press. Esta es la traducción al inglés de la obra original y es la base de lo que se presenta en este capítulo.

La Figura 2.4 muestra la separación del campo de la Teoría Especial del calor (visión microscópica) de la Teoría General (visión macroscópica) realizada por Clausius y el papel que juega el concepto de entropía como puente de enlace entre los dos enfoques.



**FIGURA 2.4 Propósito de Boltzmann y su conexión con Clausius**

Efectivamente, Boltzmann busca aproximarse al estudio de los gases a partir del postulado que sostiene que el calor es un movimiento molecular. Para ello hace uso, de una analogía mecánica:

“Tomamos primero el punto de vista moderno de una descripción pura y aceptaremos las conocidas ecuaciones diferenciales para los movimientos internos de cuerpos sólidos o fluidos. Por ejemplo colisiones de dos cuerpos sólidos, movimiento de fluidos, en los que tan pronto como la forma del cuerpo se desvía un poco de una figura geométrica sencilla, surgen ondas las cuales se cruzan una a la otra azarosamente, de tal manera que la energía cinética del movimiento visible original debe finalmente ser disuelto en movimiento ondulatorio invisible. Esta consecuencia matemática de las ecuaciones que describen los fenómenos conduce (en cierto grado por sí misma) a la hipótesis de que todas las vibraciones de las partículas más pequeñas en las cuales las ondas se transforman,

deben ser idénticas con el calor que observamos se produce y que el calor generalmente es un movimiento en pequeñas regiones invisibles para nosotros. Así surge la vieja perspectiva de que el cuerpo no llena el espacio continuamente en el sentido matemático, sino que consiste en moléculas discretas inobservables por su pequeño tamaño. (Boltzmann, 1964, p 27)

Es decir, señala Boltzmann, **“espero probar que la analogía mecánica entre los hechos sobre los que se basa la segunda ley de la termodinámica y las leyes estadísticas de movimiento de las moléculas de un gas, es más que una semejanza superficial”**.

De su desarrollo, Boltzmann deduce una cantidad que nombra H a la que identifica como la entropía negativa misma que, como tal, siempre debe disminuir o permanecer constante bajo la suposición de que la distribución de velocidades de dos moléculas que colisionan no están correlacionadas.

### 2.2.1 Vacío Conceptual y Problema

Boltzmann va acercándose al propósito anunciado, por medio del análisis de lo que ocurre cuando las moléculas en su movimiento chocan elásticamente entre sí<sup>19</sup>.

Para ello, se apoya en su conocimiento de los trabajos previos de Maxwell relacionados con distribuciones de velocidades de partículas y, por otro lado, en la perspectiva microscópica que asume, misma que no era un campo de interés para los científicos de su época pues en su mayoría no aceptaban la teoría corpuscular de la materia<sup>20</sup>. Clausius mismo, en su estudio del “trabajo interior” renuncia a calcular las “fuerzas interiores”. Dando un giro, prefiere centrarse en el cálculo del trabajo necesario para vencerlas, pues señala, las expresiones son más sencillas y “no es necesario conjeturar” (Clausius, p. 261).

Así Boltzmann, desde una *“percepción significada”* (enterada) *“ve que”* existe un vacío en la teoría y que es posible encontrar una relación entre las perspectivas macroscópica y

<sup>19</sup> Para el desarrollo matemático de los puntos señalados se remite al lector a la obra citada de Boltzmann.

<sup>20</sup> No puede dejar de mencionarse los fuertes ataques a los trabajos de Boltzmann por parte de Ernst Mach (1838-1916) y de Wilhelm Ostwald (1853-1932) quienes argüían que la teoría física debería tratar sólo con cantidades macroscópicas y observables y que los conceptos puramente hipotéticos, como el átomo deberían ser rechazados. Boltzmann muere en 1906, dos años antes de que los experimentos de Perrin y Millikan aportaran la evidencia necesaria para aceptar la teoría discreta de la materia.

microscópica, para plantearse como problema el construir una descripción más precisa de la naturaleza del movimiento de las partículas que constituyen un gas.

Como presupuestos: 1) excluye cualquier diferencia cualitativa entre el calor y la energía mecánica, 2) mantiene la distinción entre la energía potencial y cinética, en el tratamiento de las colisiones entre las moléculas, 3) adopta analogías mecánicas, y las ecuaciones diferenciales para movimientos internos y 4) asume que los cuerpos no están llenos de materia de manera continua sino que consisten de moléculas discretas e inobservables debido a su pequeño tamaño.

Boltzmann argumenta en favor de una visión microscópica para la materia y, desde ella, acepta con Clausius que el calor es un movimiento permanente de moléculas. Al respecto, explica los estados de la materia de la siguiente manera:

“... podemos obviamente tener una idea burda (del estado sólido) suponiendo que en un cuerpo sólido cada molécula tiene una posición de reposo. Si se aproxima a una molécula vecina es repelida por ella, pero si se mueve alejándose existe una atracción (...) si cada molécula vibra alrededor de una posición de reposo fija, el cuerpo tendrá una forma fija y está en el estado de agregación sólido. La única consecuencia del movimiento térmico es que en la posición de reposo las moléculas serán empujadas apartándose unas de otras y el cuerpo se expandirá algo. Cuando el movimiento térmico se vuelve más rápido se llega a un punto en el que las moléculas se aprietan unas con otras sin regresar al punto de equilibrio (...), se arrastran unas entre otras como gusanos de tierra y el cuerpo se derrite... cuando los movimientos de las moléculas aumentan más allá de un límite definido las moléculas individuales de la superficie del cuerpo se escapan y vuelan libremente; el cuerpo se evapora (...)

Un espacio cerrado suficientemente grande en el que sólo se encuentren moléculas moviéndose libremente, proporciona una idea de un gas. Si no actúan fuerzas externas sobre las moléculas, éstas se mueven, como proyectiles disparados de armas, en líneas rectas con velocidad constante. Sólo cuando se pasa muy cerca de otras moléculas o cuando colisionan entre ellas o con las paredes se desvían de su trayectoria rectilínea. (Boltzmann, pp. 29 y 30)

Boltzmann “ve” los estados de la materia “como” estados de agregación, pero no menciona en ningún momento el concepto de “disgregación” acuñado por Clausius relacionado con el

arreglo de las partículas de tales estados<sup>21</sup>. No obstante, su intención de buscar enlazar “las leyes estadísticas del movimiento de moléculas de un gas con la segunda ley de la termodinámica” de Clausius la deja perfectamente explícita (Boltzmann, p. 28).

¿Porqué escoger la segunda ley y con ella el concepto de entropía? Para contestar esta pregunta revisemos primero lo siguiente.

### 2.2.2 La inconmensurabilidad con Boltzmann

El trabajo del autor que nos ocupa presenta características singulares en un sentido paradigmático, pensando en las dos acepciones (kuhniano y ejemplar) del término. Es ejemplar, porque a contracorriente con las ideas de su tiempo tiene la audacia de adoptar y aceptar la naturaleza discreta de la materia, de “mirar” de manera diferente al calor (como un movimiento molecular o de partículas) y, con la fuerza de un razonamiento inductivo-deductivo, plantea conexiones entre dos mundos (el macroscópico y el microscópico) hasta entonces separados. En cuanto a la acepción kuhniana de paradigma, con Boltzmann nace otro paradigma, con base en **dos cambios**: uno en el método, en la herramienta matemática y el otro, en la concepción de la entropía.

#### *2.2.2.1 Cambio en el método*

El cambio en el método fue una necesidad derivada de la perspectiva microscópica adoptada. Al aceptar Boltzmann al calor como un movimiento de partículas, su estudio lo remite, por un lado, hacia las leyes de la mecánica y por el otro, dado el enorme número de moléculas a considerar, a planteamientos estadístico-probabilísticos como el de Maxwell.

La prueba de la ley de la distribución de velocidades de Maxwell la desarrolla con base en suposiciones como la que afirma que las moléculas son esferas elásticas y otra suposición especial que se refiere al desorden. Esta nueva suposición es particularmente importante porque es la primera ocasión en la que Boltzmann alude al desorden pero, ¿de qué desorden

---

<sup>21</sup>Al respecto, citemos a Clausius “la disgregación como ya se ha dicho, representa el grado de división de los cuerpos. Así, por ejemplo, la disgregación de un cuerpo es más grande en el estado líquido que en el estado sólido y más grande en el estado gaseoso que en el estado líquido ... La disgregación de un cuerpo está completamente determinada si se da el arreglo de las partículas, pero no recíprocamente”...(Memoria VI, p 265)

se trata? ¿es el desorden al que se alude cuando se define a la entropía como “la medida del desorden”? A partir del estudio del trabajo de Boltzmann, daremos más adelante una respuesta.

La prueba relacionada con la distribución de Maxwell la desarrolla Boltzmann a través del cálculo de la frecuencia de colisiones entre las moléculas esto es:

Suponemos que se tienen dos clases de moléculas en un contenedor. Cada molécula de la primera clase tiene masa  $m$  y la otra  $m_1$ . La distribución de velocidad que prevalece después de un tiempo arbitrario  $t$  estará representada por tantas líneas rectas (empezando por el origen de las coordenadas) como moléculas  $m$  haya en un volumen unitario (...) la punta de las líneas será llamada el punto de velocidad de la molécula correspondiente (...) (Boltzmann, p. 40).

Después de diferentes consideraciones<sup>22</sup> llega a la expresión:

$$Z_\varphi = \varphi F_1 d w_1 \quad (2)$$

donde:

$Z_\varphi$  es el número de colisiones de la clase especificada que ocurren en el elemento de volumen  $d w_1$  durante el tiempo  $dt$ . Las moléculas son de una clase especificada cuando sus puntos de velocidades están en el elemento de volumen  $dw$ .

$\varphi$  Volumen al inicio de  $dt$

$\varphi F_1 d w_1$  Número de centros de  $m_1$  moléculas de la clase especificada que están en el volumen  $\varphi$ .  $F_1$  es el número de moléculas cuyas componentes de velocidad están en las tres direcciones-coordenadas y en  $dw$ .

En palabras de Boltzmann:

En esta fórmula [se refiere a la fórmula (2)] existe una suposición especial, esto es, desde el punto de vista de la mecánica cualquier arreglo de moléculas en el contenedor es posible; en algún arreglo, las variables que determinan el movimiento de las moléculas puede tener diferentes valores promedio en una parte del espacio lleno con el gas que en otra, donde por ejemplo la densidad o velocidad media de una molécula puede ser más grande en una mitad del contenedor que en la otra, o más generalmente, alguna parte finita del gas tiene diferentes propiedades que otra. Tal

<sup>22</sup> Ver desarrollo en Boltzmann (1964) pp. 36-43. Aquí sólo se destaca lo esencial para nuestro estudio.

distribución será llamada “ordenada-molarmente” (molar-ordered) (...) Si el arreglo de las moléculas tampoco exhibe regularidades que varíen de una región finita a otra –si está entonces molarmente desordenada- entonces pese a ello grupos de dos o pequeños grupos de moléculas pueden exhibir regularidades definidas. Una distribución que exhiba regularidades de esta clase será llamada molecularmente-ordenada. Se tiene una distribución molecularmente ordenada si –para seleccionar solo dos casos- cada molécula se mueve hacia su vecino más cercano o, como otro caso, si cada molécula cuya velocidad está entre ciertos límites tiene diez moléculas vecinas mucho más lentas. Cuando estos agrupamientos especiales no están limitados a lugares particulares dentro del contenedor sino que se encuentran en promedio igualmente distribuidos a través de todo el contenedor entonces la distribución será llamada molar-desordenada (molar-disordered) (...) La presencia de las  $m_1$  moléculas en el espacio  $\varphi$  no puede considerarse en el cálculo de probabilidad como un evento independiente de la cercanía de las moléculas  $m$ . La validez  $Z_\varphi$  puede ser considerada como definiendo el significado de la expresión: la distribución de estados es molecularmente desordenada. (Boltzmann pp. 40 y 41)

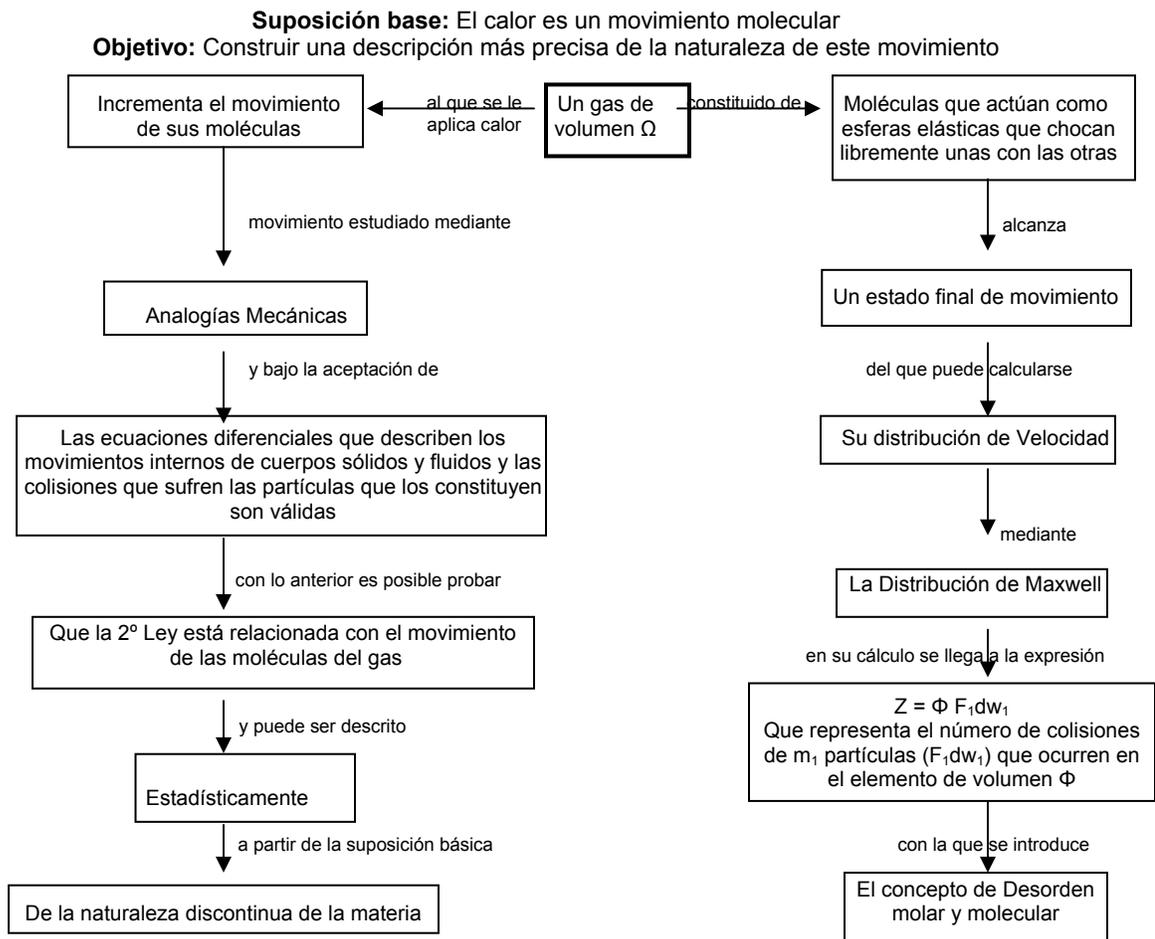
La extensa cita de Boltzmann se considera oportuna porque en ella aparece no un concepto de desorden sino de dos: al que llama desorden molar y el desorden molecular. Sin embargo, después de afirmar que si se cumple que la trayectoria libre media en un gas es grande comparada con la distancia media de dos moléculas vecinas, entonces una distribución molecularmente ordenada pero con desorden molar, se transformará en una distribución molecularmente desordenada, no menciona más el desorden molar. La **suposición especial** que fue señalada anteriormente descansa en la afirmación de que **la distribución de estados es molecularmente desordenada (molecular-disordered)**.

Conviene subrayar que el desorden molar lo relaciona con la densidad o la **velocidad** media de las moléculas, mientras que el desorden molecular lo relaciona con el **arreglo** de las moléculas, lo que nos hace recordar los términos Y y Z de Clausius, el primero teniendo que ver con el movimiento y el segundo con la disgregación o arreglo espacial de las partículas.(Boltzmann p. 40)

Por ahora destacamos que Boltzmann señala como indispensable y necesaria, la asunción de que la distribución de estados es molecularmente desordenada (molecular-disordered) pues de no ser así dice, “sería imposible probar los teoremas de la teoría de los gases debido a la imposibilidad de calcular las posiciones de todas las moléculas en cada momento, ni tampoco podría probarse que la distribución de velocidades de Maxwell es posible” (Boltzmann p. 41).

Acepta por último que su teorema H o Teorema mínimo<sup>23</sup> está ligado también a la **suposición de desorden** y explícitamente afirma que, cambiando ahora los términos, el “movimiento esta molar y molecularmente desordenado (molar and molecular-disordered) por lo que (concluye)  $Z_\phi$  es válida. “Boltzmann p. 42).

Volviendo al método de Boltzmann como un cambio en el tratamiento del problema ya atacado en su momento por Clausius, se enfatiza que éste se da por el uso de un razonamiento basado en una matemática con raíces estadístico-probabilísticas. Este tratamiento inaugura una nueva rama para la física, la Mecánica Estadística, y aporta elementos para otro mirar. La Figura 2.5, muestra sintéticamente las dos ramas de este desarrollo.



**FIGURA 2.5 Teoría Especial del Calor: Analogía Mecánica para el comportamiento de un gas**

<sup>23</sup>“El valor de H disminuye a través de las colisiones. Es decir, a través de las colisiones la distribución de las velocidades de las moléculas de un gas se acerca cada vez a la distribución más probable, bajo la suposición de que el estado es molecularmente desordenado. (Boltzmann, 1964, p. 58)

### 2.2.2.2 Cambio en la entropía

Boltzmann se había propuesto “probar que la analogía mecánica entre los hechos sobre los que está basada la segunda ley de la termodinámica y las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas de un gas, es más que una semejanza superficial” (Boltzmann, p. 28).

En efecto, en 1895 años después de la realización de su trabajo, declara que “los trabajos de Clausius y Maxwell (y desde luego el suyo propio) habían marcado una ruptura en la trayectoria (de la termodinámica)”.(Boltzmann p. 22). Es de suponer que tal declaración la basa en el éxito de la prueba anunciada antes.

Boltzmann, como lo anuncia en su propósito, realiza dos cálculos independientes para acercarse a la entropía: uno basado en consideraciones mecánico-newtonianas y el otro a a partir de consideraciones estadísticas. Posteriormente, compara los resultados y concluye ue las expresiones obtenidas son equivalentes entre sí y con la entropía

Para el primer cálculo, imagina un gas con un volumen  $\Omega$  al que se le aplica una cantidad de calor  $dQ$  dando lugar a una elevación  $dT$  en su temperatura y un aumento de  $d\Omega$  en el volumen. Hace  $dQ = dQ_1 + dQ_4$  en donde  $dQ_1$  representa el calor usado en aumentar la energía molecular y  $dQ_4$  representa el calor que es usado para realizar trabajo externo. A su vez  $dQ_1$  se consumirá tanto en aumentar la energía cinética con la que las moléculas se mueven entre sí (que Boltzmann llama movimiento progresivo) como en la realización de trabajo para vencer las fuerzas de resistencia intramoleculares que sostienen los átomos juntos.

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3$$

De todo ello obtiene la relación:

$$\int \frac{dQ}{T} = \frac{Rk}{\mu} \ln [T^{3/2(1+\beta)} \rho^{-1}] + \text{constante} \quad (1B)$$

expresión que corresponde a la fórmula para la entropía bajo condiciones mecánicas donde  $Rk$  y  $\mu$  son constantes.  $T$  la temperatura,  $\rho$  la densidad del gas,  $\beta$  es constante y función sólo de la temperatura.

Por otro lado, Boltzmann realiza un segundo cálculo<sup>24</sup> bajo consideraciones estadísticas, y obtiene que

$$H = \int f \ln f \, dw \quad (2B)$$

donde  $f$  para el estado estacionario de un gas, es

$$f = a e^{-hmc^2} \quad (\text{Distribución de Maxwell})$$

y  $h=1/2RMT$ ;  $c^2 = 3/2hm$ ;  $\int f \, dw = n$ ;  $a=n(h^2 m^3 / \pi^3)^{1/2}$ ; R constante; M la masa de una molécula de hidrógeno

Boltzmann resuelve la integral y, al lado de una constante, llega a la expresión:

$$H = n \ln (\rho T^{-3/2})$$

de la que señala que “-H representa el logaritmo de la probabilidad del estado del gas considerado”(p.74). Como el logaritmo de la probabilidad de un estado de un gas de un volumen doble es -2H, de un volumen triple 3H,...y de un volumen  $\Omega$ ,  $\Omega H$ , entonces el logaritmo de la probabilidad B del arreglo de las moléculas y de la distribución de estados de varios gases es:

$$\ln B = -\sum \Omega H = \Omega n \ln (\rho T^{-3/2})$$

Posteriormente parte de su Teorema H<sup>25</sup>, desde el cual puede “ver que” existen semejanzas entre la H negativa y la entropía, semejanzas que ya esperaba y, que fueron buscadas en el desarrollo con el que presenta “el significado físico de la cantidad H”.

Efectivamente, realizando algunas manipulaciones algebraicas, se tiene que:

$$R M \ln B = R \sum k/\mu \ln (\rho^{-1} T^{3/2})$$

Donde es posible ver que el segundo miembro se corresponde con la expresión encontrada para la entropía a partir de la mecánica newtoniana.

Con lo anterior Boltzmann demuestra lo que se había propuesto y concluye que la segunda ley es una ley probabilística. **La entropía por su parte queda expresada con el logaritmo natural del número de estados posibles en los que puede estar el gas.** De esta forma Boltzmann encuentra una relación con la que se enlazan “los hechos (macroscópicos) sobre los que está basada la segunda ley y las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas (microscópicas)”. Esto es, establece una conexión entre dos perspectivas, entre dos mundos.

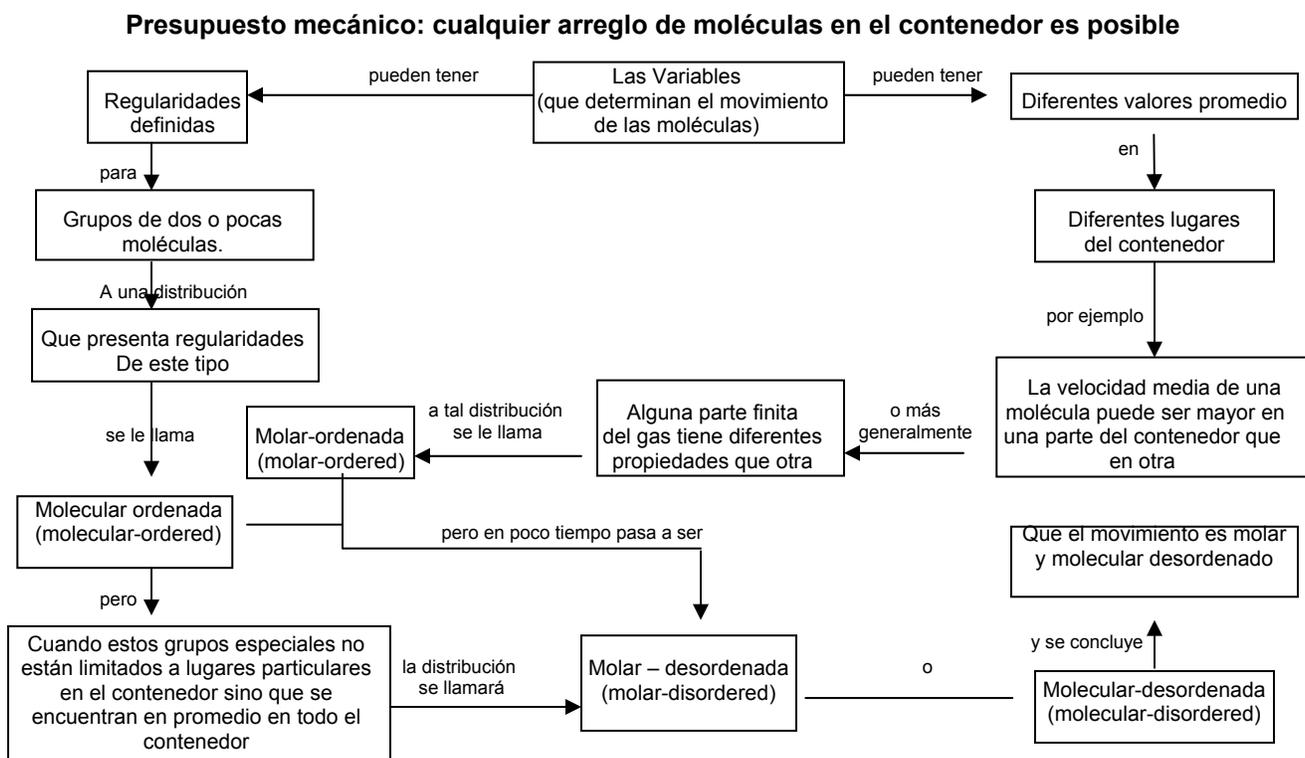
<sup>24</sup> No reproducimos los cálculos de Boltzmann. Se remite a los interesados a la obra de Boltzmann (1964, Capítulo 1, pp36-109)

<sup>25</sup> H disminuye a través de las colisiones. (Boltzmann, p58).

La respuesta a la pregunta que se planteó al final de 2.2.1, respecto a ¿porqué escoger la segunda ley y con ella el concepto de entropía?, podría responderse ahora expresando que la segunda ley (al marcar restricciones a los procesos espontáneos y la dirección de éstos a través de la entropía), la hacen propicia para ser pensada desde lo microscópico especialmente bajo la consideración de ser la entropía un concepto en el que Clausius separa la componente “Y” ligada al “movimiento de partículas” (relacionada con la temperatura), de la otra componente “Z” más ligada con el arreglo de las partículas, con el distanciamiento entre ellas y en última instancia con el volumen.

Resulta interesante resaltar que en  $dQ_1$  y  $dQ_4$  (que aparecen en el desarrollo mecánico de Boltzmann al calcular la entropía) se encuentran semejanzas con los componentes Y y Z de la entropía aunque no hace alusión a ninguno de esos componentes.

Otra novedad en el trabajo de Boltzmann aparece con los conceptos de desorden molecular y molar (Figura 2.6).



**FIGURA 2.6 Desorden Molar y Molecular**

Cabe recordar que tales conceptos surgen del presupuesto mecánico de que cualquier arreglo de moléculas es equiprobable, por lo que en el razonamiento de Boltzmann se aceptan ciertas regularidades (igualdad) de las variables que definen el movimiento molecular sea en ciertas partes del contenedor (orden-molecular) sea, en ciertas moléculas o grupos de ellas pero dada la imposibilidad de que tales regularidades se mantengan en el tiempo se concluye que el movimiento es molar y molecularmente desordenado.

Pero, ¿cómo impacta esta conclusión respecto al desorden, la definición de entropía?, de hecho **no la impacta** es decir, en las enunciaciones de Boltzmann, al menos en la obra que se está revisando, no formula una proposición explícita entre el desorden y la entropía. El movimiento como desorden molecular queda como un supuesto necesario y claramente expresado (Boltzmann, pp.40 y 41) en esta obra, pero solo eso. Así pues, como una conclusión provisional, podríamos aseverar aquí que la frase con la que se define y reconoce actualmente a la entropía (“como medida del desorden”) **no se origina con Boltzmann**, aunque sí se inspira en su trabajo, seguramente reinterpretando lo que Boltzmann **sí** dice al plantear que la cantidad  $\Omega H$  ( $\Omega$  volumen y  $H$  surge de su Teorema) “...puede ser considerada como **una medida de la probabilidad** de los estados” (el subrayado es nuestro).

En este punto puede afirmarse que Boltzmann no “*vio como*” desorden a la entropía o no lo explicitó de esa manera en esta obra, sino a través de  $H$ , pero si la *vio*, con una mirada significada, “*como*” relacionada con la probabilidad de los estados “creando así un nuevo significado para ese concepto y otro campo disciplinario para la física.

Y, siendo así ¿podría concluirse que con Boltzmann se dio un cambio de paradigma?

### 2.3 ¿Se da con Boltzmann un cambio de Paradigma?

Brevemente, un paradigma se caracteriza porque sus investigadores están unificados alrededor del mismo marco de supuestos básicos. Comparten el compromiso con leyes

teóricas fundamentales, con postulaciones de entidades y procesos, con procedimientos y técnicas experimentales, así como con criterios de evaluación (Pérez, 1999).

De acuerdo con Kuhn (1975) la estructura de la ciencia en su evolución se refleja en una serie de etapas por las que atraviesa toda disciplina científica en su desarrollo, a saber: 1) la preparadigmática, (con poco acuerdo con respecto a la caracterización de los objetos de estudio, los problemas y los procedimientos); 2) la paradigmática, (cuando el campo de investigación se unifica). Abarca el periodo conservador normal de la ciencia. En esta etapa, no se cuestiona ni se considera problemático el marco de supuestos básicos; 3) la etapa de crisis (en la que se pone en duda la eficacia y la corrección del paradigma vigente para dar solución a anomalías y nuevos problemas); 4) la etapa de revolución de la ciencia, (en la que se proponen estructuras teóricas alternativas que implican un rechazo o una modificación de los supuestos antes aceptados y, finalmente 5) la etapa de cambio y aceptación de otro paradigma, para reiniciar el ciclo.

Los cuerpos de conocimientos separados por una revolución son inconmensurables, no se pueden comparar de manera directa, esto es:

Las diferencias que acompañan a la inconmensurabilidad son diferencias en los compromisos básicos de los paradigmas; diferencias en los criterios sobre la legitimidad y el orden de importancia de los problemas; diferencia en las leyes que se consideran fundamentales; diferencias en la red de conceptos a través de la cual se estructura el campo de investigación y se organiza la experiencia; diferencias en los supuestos sobre qué entidades y procesos existen en la naturaleza y diferencias en los criterios de evaluación, es decir en la manera de aplicar valores epistémicos tales como simplicidad, consistencia, fecundidad, alcance, estructura. (Pérez, A. R. 1999, pp. 32 y 33)

Con base en Pérez (1999), se han resumido las características de los paradigmas y su cambio y lo que tal cambio implica.

Comparemos la construcción de la mecánica estadística por parte de Boltzmann, en lo referente al campo que nos ocupa, con algunas de las características del cambio de paradigmas, y con la perspectiva macroscópica de Clausius.

Al respecto: **sí** se dan diferencias en los compromisos básicos, fundamentalmente en torno al enfoque microscópico con el que se abordan ahora los problemas; **sí** hay diferencias en cuanto al orden de importancia de los problemas y en las leyes que se consideran fundamentales pues el estudio de las colisiones moleculares y los fenómenos de transporte por los movimientos moleculares ahora se vuelven relevantes, así como el tomar en cuenta las leyes de la estadística; **sí** hay diferencias en la red de conceptos como ocurre en la interpretación de la entropía y **sí** hay diferencias en las entidades y procesos que existen en la naturaleza pues el enfoque microscópico modifica la percepción, el “*ver qué*” y el “*ver cómo*”.

Citado por (Pérez, 1999 p.33), Kuhn afirma que:

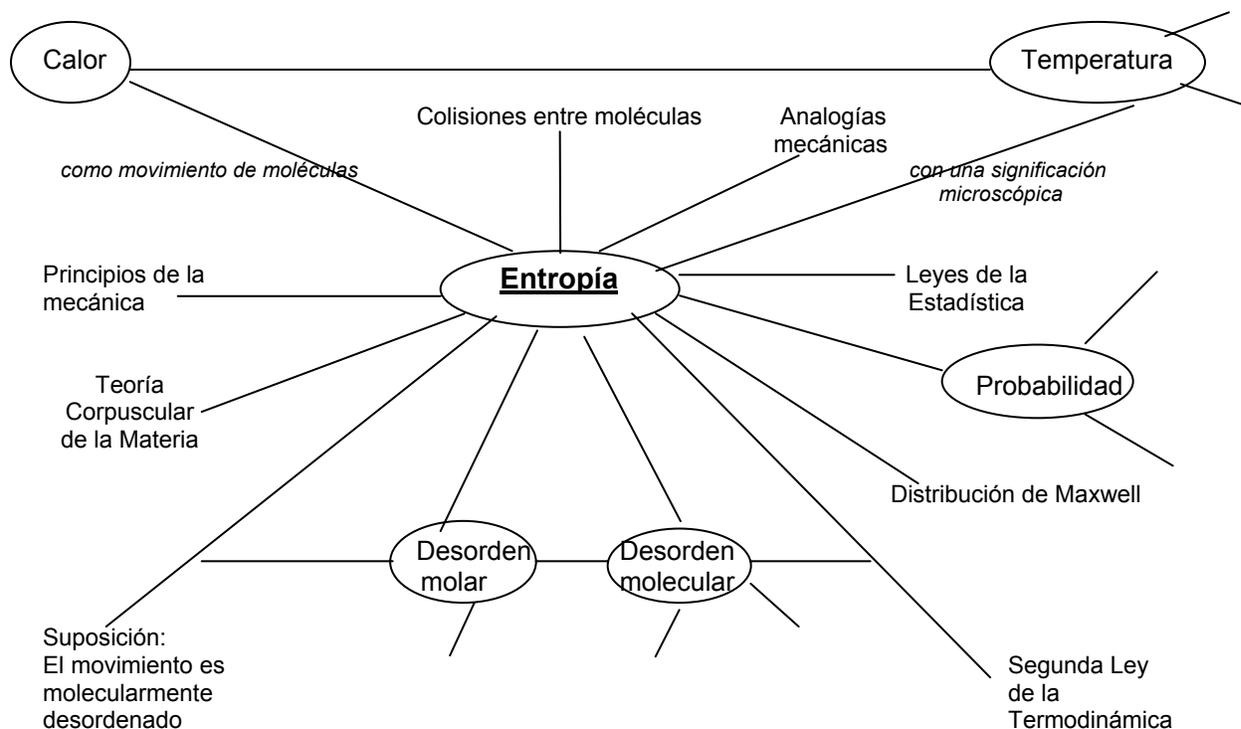
Un cambio de paradigma, se trata de una transición a una nueva forma de ver y manipular el mundo e incluso se puede decir que se trabaja en un mundo diferente: el nuevo paradigma da lugar a nuevos fenómenos y problemas...

Con base en lo anteriormente expuesto, concluimos que, con Boltzmann, **sí** se da un cambio de paradigma o más propiamente de teoría, apresurándonos a señalar que, por supuesto, la mecánica estadística no abroga la termodinámica. Cada una tiene sus espacios de validez y sus alcances propios.

Es procedente regresar ahora a la pregunta, ¿el concepto de entropía de Boltzmann es inconmensurable con el de Clausius? Pérez Ransanz cita a Kuhn y señala que “las diferencias entre paradigmas sucesivos implican ciertos cambios de significado en los términos básicos de las teorías...” (Pérez A. R. 1999, p. 33).

De esta manera, si se dio un cambio en la teoría, se esperará que este cambio se refleje en la trama disciplinaria y que la entropía sea un “nudo” en ella tal como fue visualizada con Clausius en la Figura 2.3.

La figura 2.7 permite apreciar los nexos principales con otros conceptos (nudos), principios, suposiciones, leyes (hilos) de esta nueva trama con cuyas conexiones e interacciones construye Boltzmann un nuevo “sentido disciplinario” una nueva “significación” para la entropía.



**FIGURA 2.7 El Concepto de Entropía como Nudo en la Trama Disciplinaria: Boltzmann**

Con relación a la inconmensurabilidad ésta efectivamente existe, pues desde Clausius no es posible traducir el significado probabilístico de la segunda ley ni el de la entropía como ligada al “logaritmo de los estados posibles”. Para ello tendría que cambiarse de supuestos y realizar un esfuerzo de interpretación. No obstante, por otro lado, existen ciertas coincidencias entre las dos teorías que permiten su comparación, por ejemplo, en la concepción del calor, que las acerca. Esto puede explicarse con la siguiente cita:

...dos teorías inconmensurables pueden compararse porque el carácter local de la inconmensurabilidad permite detectar, en el contexto, un conjunto de afirmaciones empíricas que tienen el mismo significado en ambas teorías y que además no está en disputa. Este conjunto de afirmaciones o creencias compartidas, a pesar de ser revisable en una etapa posterior, sirve por el momento como una base relativamente estable y neutral desde la cual arranca la comparación. (Pérez, R. A. 1999. p. 126)

En suma, el trabajo de Boltzmann y la adopción de la teoría corpuscular de la materia, cambia la “mirada”, la *significación perceptual* y el acercamiento metodológico hacia los problemas a explicar.

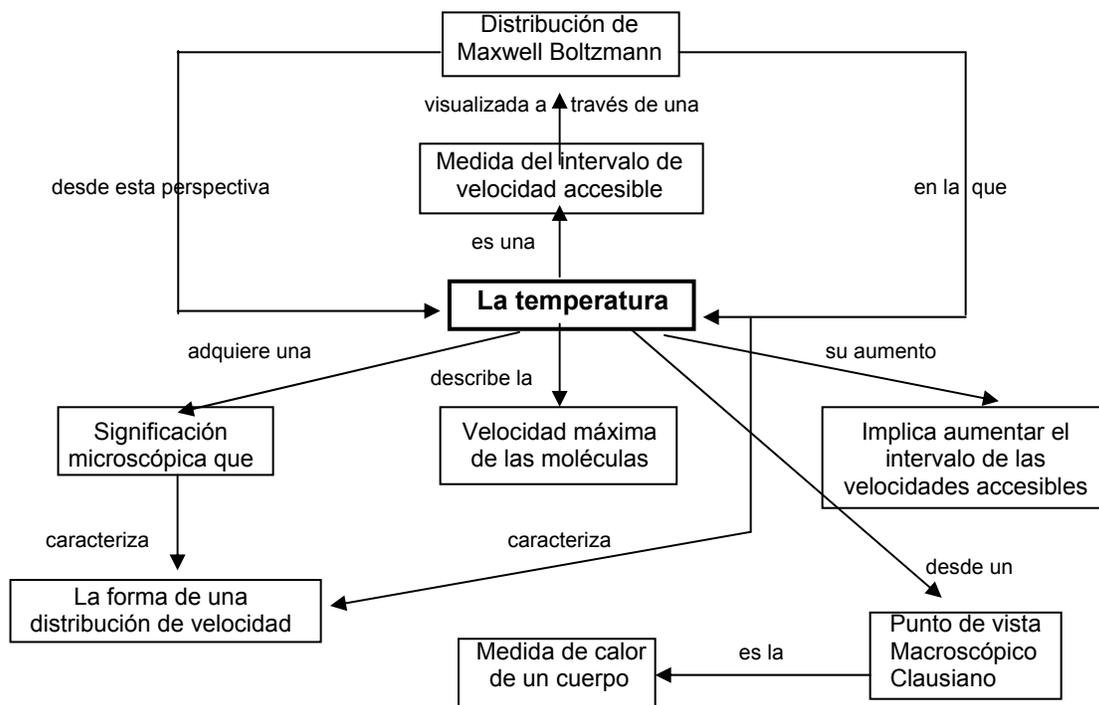
Con el nuevo bagaje teórico, Boltzmann “*resignifica*” los conceptos de Clausius y construye

otra trama disciplinaria en la que la Segunda Ley y la entropía adquieren un nuevo “sentido disciplinario”, ligado a su posición en la trama (Fig. 2.7). La teoría construida por Boltzmann implica un cambio de paradigma (o teoría en este caso<sup>26</sup>) y el sentido de la entropía es inconmensurable con el construido por Clausius. Por otro lado, y con base en la obra revisada, puede afirmarse que la definición, con la que se conoce actualmente a la entropía, no fue acuñada en esos términos por Boltzmann, pese a que es él quien introduce el concepto de desorden (molar y molecular)

Brosseau y Viard ya citados, destacan otra contribución de Boltzmann relacionada al carácter microscópico que adquiere la temperatura en su trama disciplinaria. Aunque, aquí no se ha enfatizado ese hecho, se concuerda con la significación que estos autores presentan en su estudio pues, efectivamente, la expresión de Boltzmann para la entropía:

$$[dQ/T = Rk/\mu \ln [T^{3/2(1+p)} \rho^{-1}]] \text{ (p. 72)}$$

está en función de la temperatura y en última instancia del movimiento molecular, de las velocidades moleculares y de su distribución. (Fig. 2.8)



**FIGURA 2.8 Temperatura: Contribución de Boltzmann**  
(Punto de vista microscópico. Interpretación de Brosseau – Viard)

<sup>26</sup> “En los años setenta, Kuhn restringe el dominio de la relación de inconmensurabilidad (...). Las entidades con las que se predica esta relación ya no son los paradigmas considerados globalmente, o las tradiciones de investigación, sino las teorías (subrayado en el original) que se propone en los paradigmas sucesivos, y más precisamente sus léxicos o vocabularios. (Pérez, A. 1999, p. 86)

## 2.4 Continuadores<sup>27</sup>: Planck (1990), Fermi (1956), Sommerfeld (1956), Schrödinger (1944)

Sin la intención de realizar el estudio de estos autores con el detalle con el que fueron planteados los trabajos de Clausius y Boltzmann, haremos una breve descripción de los puntos más cercanos a nuestro campo de interés, a saber: la segunda ley de la termodinámica y la entropía, con el propósito de rastrear las modificaciones o las interpretaciones novedosas que pudieran darse con ellos.

Los autores mencionados fueron seleccionados por considerarlos representativos hasta mediados del siglo XX de una tradición de investigación en la termodinámica que inicia con Clausius y que continúa hasta nuestros días con trabajos como el de Liebe e Yngvason (1999).

Para fines de comparación, destacaremos de cada investigador, incluyendo a Clausius y a Boltzmann, los elementos relevantes del Campo de Conceptualización caracterizado en la Figura 2.1, a saber:

- a) *la realidad*, campo de lo concreto que se capta desde una “percepción significada” y que permite la detección de vacíos disciplinario-conceptuales.
- b) el campo de problemas, de *interrogantes o propósitos* al que remite el vacío o necesidad percibida.
- c) la descripción del *concepto, noción o ley* que se haya construido, o ampliado, enfocado a la Segunda Ley y a la entropía
- d) el campo *matemático abstracto-simbólico* de codificación (modelización-representación o expresión matemática) en el que se apoye la construcción del sentido matemático de la ley y/o noción o concepto de interés.
- e) el campo de construcción de *sentidos físico-disciplinarios (significación disciplinaria)*. De interacción, entre lo concreto y lo abstracto, de conceptualización de respuestas a las interrogantes planteadas por los vacíos detectados.

---

<sup>27</sup> En el recorrido histórico realizado en relación con la entropía, se seleccionaron estos autores por tener cada uno: obras escritas relacionados con la termodinámica, una posición respecto a la misma y una influencia destacada en el área.. Los años de las obras, corresponden a la edición revisada de los trabajos originales.

De esta manera, de cada autor se resalta: el *propósito*, la *definición*, el *desarrollo matemático* y el *sentido físico o explicación* que le otorgan a la Segunda Ley y a la entropía, cuando este sentido o explicación es explícito.

El desarrollo matemático, cuando es breve, como en el caso de Planck y Sommerfeld, se reproduce en su esencia en el texto. Cuando es más extenso, como el caso de Fermi y Schrödinger, se reproduce en forma de diagrama de flujo en la figuras 2.9 y 2.10.

Como se ha dicho, el orden cronológico determina la presentación de los autores, siguiéndolo, se inicia con Planck continúa con Fermi, Schrödinger y Sommerfeld abarcándose así con ellos un periodo de medio siglo, desde los primeros años del siglo XX hasta la década de los cincuenta.

#### 2.4.1 Max Planck

En la obra que nos ocupa, Planck se *propone* “obtener una expresión matemática para la entropía de un sistema y probar sus propiedades” Planck (1990, p.88).

La *expresión* para la segunda ley, es planteada resaltando lo observable, en los siguientes términos: “el cambio de trabajo mecánico en calor puede ser completa, pero al contrario, el cambio de calor en trabajo es incompleto pues cuando una cierta cantidad de calor es transformada en trabajo, otra cantidad de calor sufre un cambio compensatorio transfiriéndose calor desde una temperatura más alta a una más baja” (p. 82).

Como una consideración importante, en su trabajo Planck afirma que “sólo existe una manera de mostrar claramente el *significado* (el resaltamiento es nuestro) de la segunda ley y es sobre la base de los hechos, formulando proposiciones que pueden ser probadas o rechazadas por el experimento”. (p.83)

En esa dirección establece las siguientes tres proposiciones que poseen la característica de poderse probar de la manera indicada (p. 83):

1. No hay manera posible de revertir completamente un proceso en el cual el calor ha sido producido por fricción
2. Cuando pesos en caída libre (atados a paletas giratorias), han generado calor en agua o mercurio por la fricción de las paletas, ningún proceso puede ser inventado con el cual se restaure donde quiera y completamente, el estado inicial de ese experimento
3. No hay manera posible de revertir completamente un proceso en el cual un gas se expande, sin que se realice trabajo o se absorba calor.

Cada una de estas proposiciones es en sí misma una de las muchas expresiones con las que puede plantearse o definirse la segunda ley de la termodinámica, pues todas dan cuenta de la existencia de “procesos imposibles” o, dicho de otra manera, las proposiciones declaran que los procesos que se mencionan son irreversibles.

Para nuestros propósitos es interesante destacar la corriente filosófica en la que se ubica Planck. Basta revisar la Figura 1.6 para reconocerlo dentro del enfoque lógico empirista y dentro del positivismo lógico, en el que se hace descansar el significado de las proposiciones (en este caso de la Segunda Ley), en la posibilidad de la existencia de un método empírico para decidir si es verdadera, o falsa o si tiene significado o no. Bajo este criterio Planck prueba la segunda ley a partir de las proposiciones enunciadas.

Para obtener la expresión para la entropía, realiza el siguiente desarrollo para un “gas perfecto”, sujeto a una compresión o expansión infinitamente lenta y, al mismo tiempo, se le aplica calor. Así:

$$q = du + pdV$$

para un gas perfecto:

$$du = C_v dT$$

$$p = RT/mV$$

$$q = C_v dT + RT dV/mV$$

Si el proceso es adiabático, dividiendo por T y realizando la integración se obtiene

$$\phi = C_v \log T + R \log V/ m + \text{constante}$$

que Planck señala es la entropía para una masa (unitaria). Así:

$$S = C_v \log T + R \log V / m + \text{constante}$$

Planck expresa de otra manera la segunda ley, a través de la imposibilidad de construir una máquina de movimiento perpetuo (del segundo tipo) esto es, una máquina que trabaje periódicamente y que no cause más cambio excepto el de levantar un cuerpo y con ello enfriar un contenedor de calor.

De Planck por último se resalta el que exprese la segunda ley de la termodinámica:

1) como una ley empírica, 2) en términos de procesos imposibles y 3) en términos de la entropía, (*existe en la naturaleza una cantidad la cual cambia siempre en el mismo sentido en todos los procesos naturales, es la entropía*).

#### 2.4.2 Enrico Fermi

Al igual que Planck, Fermi *introduce la segunda ley haciendo ver las limitaciones a la posibilidad de transformar calor en trabajo*, pues de no haber esas limitaciones, dice, “sería posible construir una máquina con la que se podría, enfriando los alrededores de los cuerpos, transformar ese calor, tomado del ambiente, en trabajo. Y puesto que la energía contenida en la tierra, agua y atmósfera es prácticamente ilimitada, tal máquina sería equivalente a un móvil perpetuo llamado de segunda clase”<sup>28</sup>. (Fermi, 1967, p. 29). La segunda ley niega esa posibilidad.

Al respecto reproduce los postulados de Kelvin y Clausius:

El de Kelvin: Una transformación cuyo único resultado final sea transformar en trabajo el calor extraído de una fuente la cual esté a una misma temperatura, es imposible.

El de Clausius: Una transformación cuyo único resultado final sea transferir calor desde un cuerpo a una temperatura dada a un cuerpo a mayor temperatura, es imposible. (Fermi, 1967, p.31)

Una vez realizados los planteamientos anteriores, Fermi se *propone* y se da a la tarea de probarlos.

---

<sup>28</sup> Una máquina móvil de primera clase es aquella máquina que fuera capaz de crear energía violando la Primera Ley de la Termodinámica

Esta prueba la realiza de manera análoga a la seguida por Clausius, apoyándose en ciclos de Carnot reversibles e irreversibles y prueba la equivalencia de ambos postulados.

Fermi (1967, pp. 29-75) presenta para la segunda ley un *desarrollo matemático* riguroso y claro, con el que se pone en evidencia el seguimiento de un programa definido por los puntos:

- enunciación del postulado o teorema,
- prueba principal detallada,
- realización de otras pruebas secundarias necesarias para la prueba principal,
  - o prueba demostrada e implicaciones.

Esta estructura se puede seguir a través de los títulos de los temas de la secuencia que constituye la prueba, a saber: ciclo de Carnot; la temperatura termodinámica absoluta; conclusión de la prueba; eficiencia; máquinas térmicas; problemas.

En cuanto a *la entropía la introduce a través de lo que llama “propiedades de los ciclos”* (Fermi p. 46).

Partiendo de un sistema que sufre una transformación cíclica durante la cual el sistema recibe calor de un conjunto de fuentes a temperaturas  $T_1, T_2...T_n$  y las cantidades de calor intercambiadas son  $Q_1, Q_2...Q_n$ , *proponiéndose probar que*

$$\sum_{i=1}^n Q_i/T_i \leq 0 \quad \text{y llegar a la expresión general}$$

$$S_B - S_A \geq \int_A^B dQ/T \text{ para la entropía.}$$

El desarrollo de la prueba seguido por Fermi se presenta en la Figura 2.9

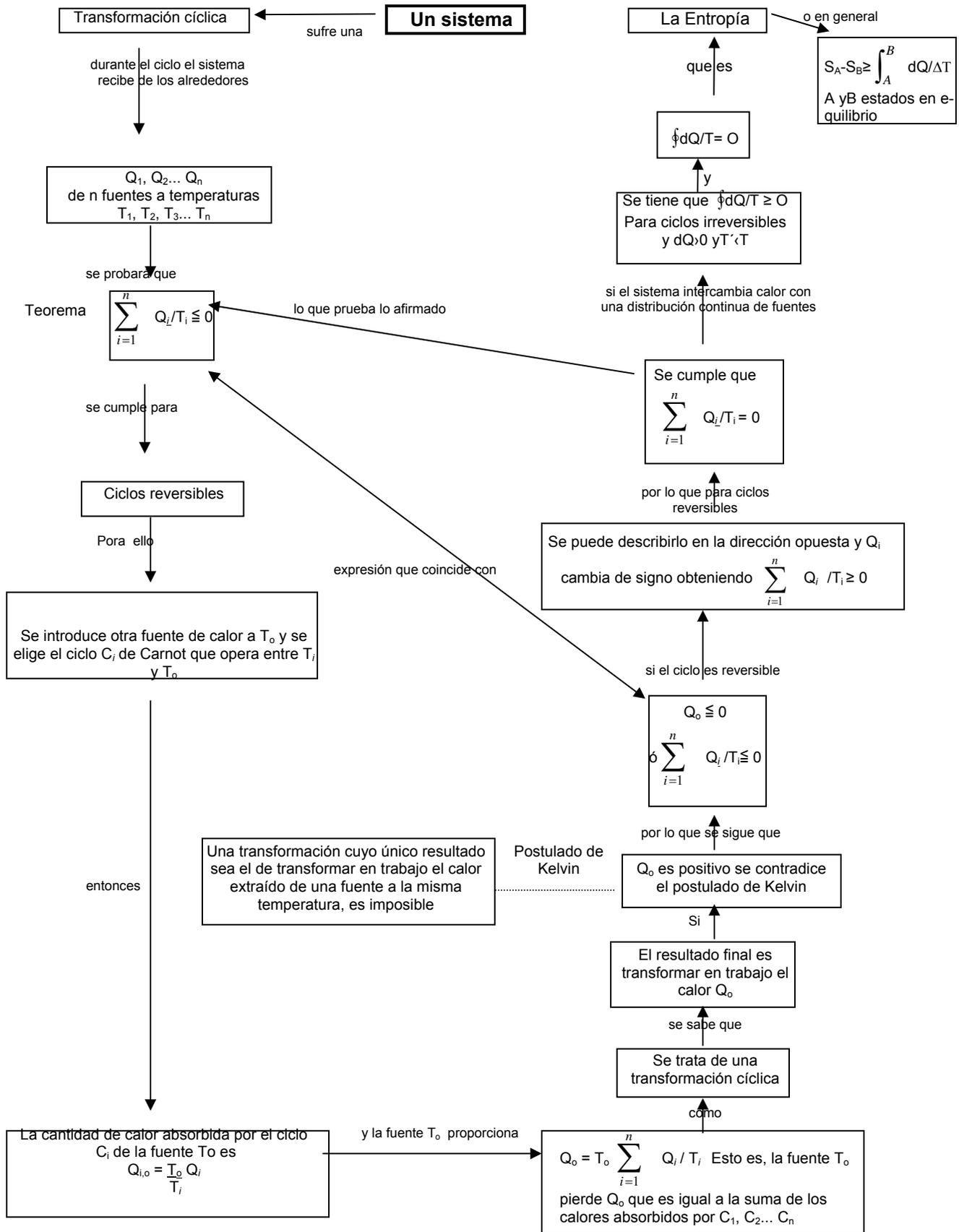


Figura 2.9 La Entropía. Desarrollo de Fermi

La entropía para Fermi es “una propiedad de los ciclos” y es una función de estado como lo señala en lo siguiente:

La propiedad expresada por el teorema que dice que el valor de la integral para una transformación reversible depende sólo de los estados extremos de la transformación y no de la transformación misma; nos permite definir una nueva función del estado de un sistema. Esta función llamada entropía que es de la mayor importancia en termodinámica se define de la siguiente manera.

Arbitrariamente se escoge un cierto estado de equilibrio O de nuestro sistema y se le llama el estado estándar. Sea A algún otro estado de equilibrio, y considérese la integral

$S(A) = \int_O^A dQ/T$  tomada sobre una transformación reversible. Por el teorema anterior, puesto que el estado O es fijo, entonces puede decirse que  $S(A)$  es una función del estado A solamente. Llamaremos a esta función la entropía del estado A (p. 50)

Con la entropía, Fermi mantiene el programa de desarrollo que ya fue mencionado. Con relación a esto, se aprecia que a diferencia de Planck, y relacionándolo con nuestro marco teórico, Fermi está cercano a la corriente logicista (Figura 1.6) en la que la verdad de los términos descansa más en la lógica (razonamiento lógico), sin que el significado del contenido juegue un papel destacado.

En efecto en Fermi, la preocupación por explicar el significado de la segunda ley (más allá de la fórmula), se encuentra ausente. La fuerza de la argumentación lógico-matemática parece ser suficiente para él pues, haciendo caso de nuestro marco teórico, podría estar considerando, a la entropía como “entidad inferida” adoptando la propuesta de Russell de substituir los conceptos teóricos por una construcción lógica.

### 2.4.3 Arnold Sommerfeld

Como objetivo, Sommerfeld (1956) se *propone* “presentar las consideraciones más esenciales en la ciencia termodinámica” e introduce la segunda ley siguiendo “la trayectoria clásica que fue iniciada por Sadi Carnot en 1824 seguido por Rudolph Clausius desde 1850 y por William Thomson en 1851” (p. 26). De esta forma, *su desarrollo* tiene fuertes semejanzas con el de

Fermi pues como él, parte de los ciclos de Carnot continuando con el cálculo y prueba de la eficiencia, la temperatura y la entropía.

Diferentemente a los otros desarrollos, *Sommerfeld establece la segunda ley de manera axiomática*, a saber:

Todos los sistemas termodinámicos poseen una propiedad que es llamada entropía. Ésta es calculada imaginando que el estado del sistema cambió a partir de un estado de referencia elegido arbitrariamente hasta el estado actual, a través de una secuencia de estados de equilibrio y sumando los cocientes de las cantidades de calor  $dQ_i$  introducidos en cada paso y la “temperatura absoluta”  $T_i$ . La  $T_i$  será definida simultáneamente en conexión con esto. (Primera parte de la segunda ley)

Durante procesos reales (no ideales) la entropía de un sistema aislado aumenta. (Segunda parte de la segunda ley)

Sommerfeld separa la prueba para cada axioma: el primero es probado con base en los ciclos de Carnot y el segundo, no lo prueba propiamente, pues señala que sólo lo reducirá a suposiciones más simples y aparentemente evidentes, que por su naturaleza no pueden ser probadas. La más sencilla es la que expresa que “el calor no puede pasar espontáneamente de un nivel a temperatura más baja a uno con temperatura más alta”, que es la debida a Clausius, y la otra, es la de la imposibilidad de construir máquinas del segundo tipo en la formulación de Planck. Al término de la prueba del primer axioma, Sommerfeld llega a la expresión  $dS = \sum dQ_i/T_i$ , que es la entropía, y la presenta como “una propiedad del sistema que sólo depende del estado mismo y no de si fue o no alcanzado de manera reversible o irreversible”. Llega a la entropía por tres caminos, uno por medio de la primera ley, otro como consecuencia de la prueba del primer axioma y el tercero a partir de la eficiencia. Puesto que el segundo desarrollo es análogo al de Fermi, mostrado en la Figura 2.9, no se repetirá aquí. A continuación se presentan los otros desarrollos mencionados.

En el basado en la primera ley se tiene que, aplicándola a un proceso reversible en un gas perfecto de masa unitaria, donde se cumplen las siguientes relaciones:

$$U = U(T); C_v = C_v(T); dU = C_v(T) dT; P = RT/\mu V$$

se tiene que para un proceso reversible,

$$dQ = dU + PdV = C_v(T) dT + R T dV / \mu V$$

dividiendo por  $T \neq 0$

$$dQ/T = C_v(T) dT/T + R dV / \mu V$$

integrando y haciendo  $dQ/T = dS$

$$\int dS = S - S_0 = C_v \log T/T_0 + (R/\mu) (\log V/V_0)$$

De esta manera se prueba que "S es una propiedad que es independiente de la trayectoria entre el estado inicial y final y con Clausius se le llama entropía, término que significa transformabilidad" (Sommerfeld, 1966) (p. 25)

El tercer desarrollo seguido por Sommerfeld para obtener la entropía, es el que sigue en la prueba del segundo axioma. Para ello a través de la eficiencia  $\eta$  hace las consideraciones siguientes:

Para dos máquinas E y E', E' es no reversible por lo que la eficiencia del ciclo reversible es mayor que la del ciclo irreversible. Es decir:

$$\begin{aligned} \eta > \eta' \\ T_2/T_1 = Q_2/Q_1 < Q'_2/Q'_1 \\ \text{y } Q'_1/Q'_2 < T_1/T_2 \end{aligned}$$

para un ciclo de Carnot infinitamente estrecho

$$dQ'_1/T_1 < dQ'_2/T_2$$

dividiéndolo en un número infinito de ciclos, para un ciclo arbitrario irreversible:

$$\oint dQ'/T < 0$$

Separando el ciclo en dos segmentos  $A \rightarrow B$  y  $B \rightarrow A$ , y suponiendo que el segmento  $B \rightarrow A$  consiste en procesos reversibles infinitesimales mientras que de  $A \rightarrow B$  consiste en procesos irreversibles infinitesimales, se tiene que en el segmento  $B \rightarrow A$ :

$$S_A - S_B = \int_B^A dQ_{\text{rev}}/T$$

Y

$$\int_A^B dQ'/T + S_A - S_B < 0$$

$$O \quad S_B - S_A > \int_A^B dQ' / T$$

Para cualquier clase de sistema (incluyendo procesos reversibles e irreversibles dentro del sistema) y  $dQ'$  puede ser representado como:

$$dQ' = dQ_{\text{exterior}} + dQ_{\text{interior}}$$

El  $dQ_{\text{exterior}}$  se introduce al sistema desde afuera y el  $dQ_{\text{interior}}$  es la transferencia de calor dentro del sistema. Para un sistema aislado se tiene que  $dQ_{\text{exterior}} = 0$  así que

$$dQ' = dQ_{\text{interior}} = dQ_i$$

$$y \quad S_B - S_A > \sum \int_A^B dQ_i / T \quad \text{la suma toma en cuenta}$$

todos los procesos individuales irreversibles y se cumple necesariamente que

$$S_B > S_A$$

Esto es, la entropía de un sistema aislado solo puede incrementarse.

La segunda ley, señala Sommerfeld, adscribe una dirección definida a los fenómenos naturales, dirección que está ausente en la primera ley. “Desde mi opinión y la de Planck, la esencia de la segunda ley consiste en la existencia de la entropía y en la imposibilidad de su disminución bajo condiciones definidas” (Sommerfeld, 1966, p.38).

En este punto Sommerfeld hace notar que habiendo demostrado el 2° Axioma de la 2ª Ley, surge una contradicción aparente con la situación que pregunta qué ocurre con la entropía en una expansión reversible en un gas aislado térmicamente (situación que coincide con la planteada por Brossseau-Viard, en el Capítulo I de este trabajo) y para la que la respuesta es que la entropía permanece constante  $S_B = S_A$

Sommerfeld señala que la paradoja es consecuencia de las condiciones de interpretación que se imponen al concepto de sistema termodinámico. La entropía efectivamente es constante cuando *se excluyen todas las interacciones irreversibles entre los componentes del sistema en equilibrio*, condiciones restrictivas que son las *que se asumen en la perspectiva clásica*, (los resaltamientos son nuestros) De esta manera, se tiene que la entropía de un sistema aislado es constante (estando el sistema en equilibrio térmico) solo bajo las suposiciones restrictivas señaladas y la paradoja desaparece. (Sommerfeld 1966, p. 34).

#### 2.4.4 Erwin Schrödinger

Como se ha mencionado, la obra de Schrödinger fue seleccionada como parte de un conjunto de estudiosos de la termodinámica, que se consideraron podían representar los cambios que se postula han surgido en el transcurso de casi un siglo en la terminología y el significado, (perceptual y disciplinario), del concepto de entropía. El título de su libro (Termodinámica Estadística), sugiere cercanía con las otras obras elegidas; sin embargo, el contenido de esta obra es producto de las transcripciones de un ciclo de conferencias impartidas, de enero a marzo de 1944, en la Escuela de Física Teórica del Instituto para Estudios Avanzados de Dublín.

Desde luego sus conferencias, adecuadas para un público de posgraduados en física teórica, rebasan con mucho los conocimientos previos que en física y en matemáticas exigen para la comprensión de la entropía los demás autores de la muestra seleccionada. Decidimos, pese a ello, mantener la obra de Schrödinger entre las escogidas porque creemos que es una evidencia del nacimiento de otro paradigma u otra teoría dentro del desarrollo de la mecánica.

Efectivamente, de manera análoga a lo señalado para la mecánica estadística, la mecánica cuántica introduce un cambio en los conceptos fundamentales de la mecánica clásica pues además de aceptar la teoría corpuscular de la materia, modifica los conceptos del movimiento de una partícula. Al respecto, la teoría clásica da por sentado que todas las coordenadas e impulsos (o velocidades) se pueden medir con la exactitud deseada dentro de los límites experimentales. En la mecánica cuántica no sólo existe el límite experimental, también existe un límite teórico por debajo del cual no se puede suprimir la influencia de la medida sobre el sistema a medir.

Así, la medida de la coordenada de una partícula cambia necesariamente su impulso conjugado en mayor cantidad, cuanto más exactamente se hace la medida de aquella. El principio de incertidumbre rompe, no sólo la certeza clásica del movimiento sino, incluso, el punto de vista, situados en la termodinámica estadística, de que un proceso físico consiste en una continua transferencia a saltos de pulsos de energía entre microsistemas. Según Schrödinger, la adscripción de cada sistema siempre a alguno de sus valores más altos de

energía es una actitud indefendible en la mecánica cuántica y es tan solo una metáfora conveniente. No obstante éste es el camino que adopta en la obra que nos ocupa “como un atajo común y conveniente” basado en la prueba que desarrolla, con la que demuestra que, si el sistema es gobernado por la mecánica cuántica, el estado de alta energía definida en el que siempre se encuentra el sistema, es uno de sus niveles cuánticos de energía en los que puede encontrarse.

Aunque los resultados son consistentes, Schrödinger advierte que debe tenerse presente que la energía, como regla, nunca es un “pico definido” sino que exhibe cierta dispersión (p.88). Dispersión que, para un sistema en un baño de calor, es casi igual a la fluctuación estadística en el tiempo, probando así la validez del uso del “atajo”, como le llama Schrödinger. Este “atajo metafórico”, lo utiliza para resolver el problema, (el único problema según Schrödinger), al que se enfrenta la termodinámica estadística, a saber: encontrar la distribución de una cantidad de energía sobre N sistemas idénticos o bien, pensado de otra manera, determinar la distribución de un conjunto de N sistemas idénticos sobre los posibles estados en los cuales dicho conjunto puede encontrarse a sí mismo, dado que la energía del conjunto es una constante E.

Lo que importa destacar para nosotros es que, en la obra revisada, Schrödinger se *propone* resolver el problema de la termodinámica estadística a partir del enfoque cuántico y determinar los estados de energía  $a_L$ .

En mecánica cuántica, el estado de un sistema está dado por la función llamada de estado  $\Psi$  ( $q_1, q_2, \dots, t$ ). Cada estado es una función en el espacio de configuración. Las  $q_1, q_2$  son las coordenadas generalizadas y  $t$  el tiempo.

$$\text{Si } A \Psi = a \Psi \quad (1)$$

$\Psi$  es una función propia (función característica o eigen función) del operador A y “a”, es el eigen valor de A.

Tomando lo anterior, y otros postulados, en consideración, en la Figura 2.10 se sintetiza a grandes rasgos, el desarrollo seguido por Schrödinger. La expresión  $a_L$  asentada en la Figura 2.10, indica la distribución de los N sistemas sobre sus niveles de energía.

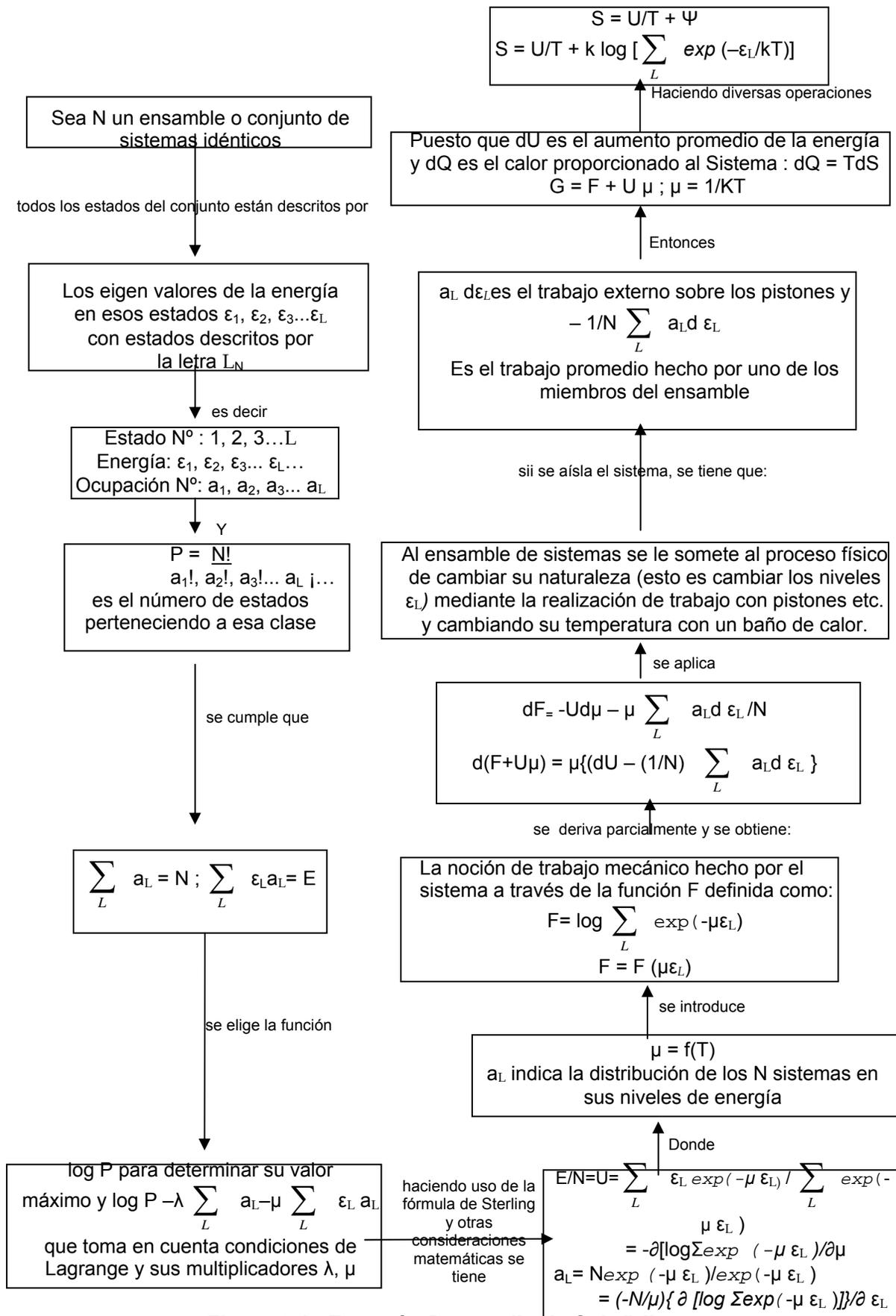


Figura 2.10 Entropía. Desarrollo de Schrödinger

“En palabras de Schrödinger: “se puede decir que [la expresión  $a_L$ ], contiene en una cáscara de nuez la termodinámica sobre esta distribución básica” (p. 8). De esta manera con la distribución  $a_L$  encontrada se resuelve el problema planteado para la termodinámica estadística. Pero, interesados nosotros en la entropía, si se sigue el desarrollo de Schrödinger a partir de la Figura 2.10, se obtiene

$$S = k \log \left[ \sum_L \exp(-\varepsilon_L / kT) \right] + U/T + \text{constante}$$

si la constante se iguala a cero, adoptando un nivel cero para la entropía, se tiene que

$$S = k \log \left[ \sum_L \exp(-\varepsilon_L / kT) \right] + \sum_L \varepsilon_L \exp(-\varepsilon_L / kT) / T \sum_L \exp(-\varepsilon_L / kT)$$

$$\Psi = S - U/T = k \log \left[ \sum_L \exp(-\varepsilon_L / kT) \right] = k \log Z$$

Donde  $k$  es la constante de Boltzmann y  $Z = \sum_L \exp(-\varepsilon_L / kT)$

Así  $\Psi = k \log Z$

$\Psi$  se introduce adoptando la notación de Planck.

Esto es, dice Schrödinger, “hemos obtenido una prescripción general – aplicable a todos los casos incluyendo la llamada nueva estadística- para obtener la termodinámica de un sistema a partir de su mecánica”. (p.13)

Comentarios analíticos

Importa resaltar que Schrödinger obtiene una nueva expresión para la entropía que se desprende de consideraciones cuánticas, a partir del análisis “del trabajo mecánico hecho por el sistema” siendo éste, básicamente el mismo fenómeno que enfrentan Clausius y Boltzmann, pero cada uno con diferentes supuestos teóricos, y herramientas matemáticas.

Los supuestos teóricos, como ya se ha dicho, *significan la percepción*, y permiten la construcción de tramas disciplinarias mismas que otorgan sentido físico a los “conceptos-nodos” que las constituyen. Por su lado la matemática, indisolublemente ligada a la física como su lenguaje, permite expresar los hallazgos particulares de manera codificada y abstracta.

Si de manera general contemplamos la termodinámica como un solo campo, éste constaría de tres etapas representadas por Clausius, Boltzmann y Schrödinger que se caracterizarían por una sofisticación creciente en la herramienta matemática utilizada en sus pruebas y desarrollos y una cierta preocupación por la explicación y explicitación de los significados físicos que portan esos desarrollos.

No obstante, parecería que en el punto de madurez de la etapa normal del desarrollo de un paradigma, como es en este caso el de la termodinámica, la *significación disciplinaria* ligada al sentido físico y a la realidad, va disminuyendo en importancia, y la *significación perceptual* del sujeto se traslada hacia un campo de mayor abstracción en el que lo que se percibe ya no es el fenómeno o la realidad sino las entidades matemáticas que la representan.

La trama disciplinaria y el sentido de los conceptos quedan en un trasfondo lejano que no requiere ser explicitado. El campo de conceptualización (Figura 2.1) gira alrededor del símbolo y de la significación matemática.

La entropía, la obtiene Schrödinger por medio de la aplicación de “un método estándar y unificado capaz de tratar sin necesidad de modificarlo con todos los casos y con cada nuevo problema que pueda surgir” (Schrödinger, 1989, p. 1). Schrödinger afirma que su interés está enfocado a este procedimiento general, y que los ejemplos son sólo tratados como ilustraciones del mismo. Su desarrollo para la entropía se presenta en la Figura 2.10. La entropía tiene en su obra varias expresiones y un sentido matemático pero tiende a omitir explicaciones o interpretaciones físicas.

Sin embargo, es en el apéndice de su obra, añadido en la 2ª Edición, en donde señala para la entropía estadística lo siguiente:

La determinación de la entropía estadística de un sistema termodinámico siempre tiene como base el conteo del número de permutaciones que obedecen ciertas restricciones o, hablando en términos de física, el número de diferentes microestados que no difieren para el observador macroscópico porque todos concuerdan con las únicas propiedades macroscópicas que pueden ser observadas por él... (P. 89)

## **2.5 Comentarios Comparativos**

Para facilitar la comparación entre los autores revisados se presentan los concentrados de las Figuras 2.11a (constructores) y 2.11b (continuadores).

En las figuras se describen sintéticamente los puntos que de cada constructor se han revisado

- la necesidad o vacío conceptual
- el problema, pregunta o propósito
- descripción de la definición, ley, noción o concepto construido o ampliado
- estrategias de desarrollo, método seguido
- explicación de la segunda ley y/o de la entropía

Campo de conceptualización	Rudolph Clausius (1852-63) Théorie Mécanique De La Chaleur	Ludwing Boltzmann (1872) Lectures On Gas Theory	Max Planck (1900) Thermodynamics
a) Necesidad (vacíos conceptuales)	Información insuficiente acerca de las transformaciones de un cuerpo	Encontrar una relación entre las perspectivas macroscópica y microscópica de la termodinámica (Continúa el trabajo de Clausius bajo la aceptación de la teoría corpuscular de la materia).	La 2ª Ley trata con una cuestión no tocada por la 1ª Ley; la dirección en la cual un proceso tiene lugar en la naturaleza. El principio de conservación de la energía no es suficiente para la determinación única de los procesos naturales.
b) Problema, Pregunta o Propósito	Descripción del estado físico de un gas cuando sufre transformaciones.	Construir una descripción más precisa de la naturaleza del movimiento de las partículas que constituyen un gas.	Probar la 2ª Ley y encontrar una expresión para la entropía.
c) Descripción de la definición, ley, noción o concepto descubierto, desarrollado o ampliado.	2ª Ley: El calor no puede pasar por sí mismo espontáneamente de un cuerpo frío a otro más caliente.	Relaciona su Teorema H con el concepto de Entropía. Demuestra el carácter probabilístico de la segunda Ley	2ª Ley. Diferentes expresiones: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es imposible construir una máquina que trabaje en un ciclo completo y no produzca mas efecto que elevar un peso y enfriar un reservorio de calor, p. 87</li> <li>▪ Existe en la naturaleza una cantidad la cual para todos los cambios del sistema o permanece constante (para procesos variables) o aumenta su valor (en procesos invariables). Esta cantidad, siguiendo a Clausius es la Entropía del Sistema.</li> </ul>
d) Estrategias de desarrollo, método seguido (apoyos matemáticos) (Sentido matemático)	Su trabajo se apoya en las investigaciones de Carnot y de Joule, en la validez del principio de conservación de la energía y en la equivalencia de las transformaciones.	Hace uso de analogías mecánicas y de la validez del análisis mecánico-estadístico. Introduce el concepto de probabilidad.	Análogas a las de Clausius, Thomson... Parte de los hechos, del fenómeno para probar la 2ª Ley. Plantea la prueba a través del establecimiento de proposiciones que puedan ser probadas por el experimento.
e) Explicación de la 2ª Ley y/o de la Entropía (Sentido Físico)	La Entropía como el valor de transformación de un cuerpo constituida por dos partes, una ligada a la temperatura y la otra al arreglo de sus moléculas	La entropía ligada al logaritmo de la probabilidad los estados posibles.	Impone condiciones adicionales o criterios sobre los procesos que tienen lugar realmente en la naturaleza. p. 79 2ª Ley en términos de la entropía: Existe en la naturaleza una cantidad la cual cambia siempre en el mismo sentido en todos los procesos naturales: es la entropía.

**FIGURA 2.11a Campo de Conceptualización: Constructores**

Campo de Conceptualización	Enrico Fermi (1932) Thermodynamics	Arnold Sommerfeld (1956) Thermodynamics and statistical Mechanics	Erwin Schrödinger (1944) Estadística Termodinámica
a) Necesidad (vacíos conceptuales)	La 1ª Ley de la Termodinámica surge como el resultado de la imposibilidad de construir una máquina que pueda crear energía, pero no pone limitaciones a la posibilidad a transformar energía de una forma a otra siempre y cuando sean equivalentes. Esto se cumple en la transformación del trabajo en calor pero la transformación inversa de calor en trabajo tiene limitaciones. La 2ª Ley, presentada por Clausius, enuncia esas limitaciones.	Desarrollar la termodinámica axiomáticamente	Desarrollar brevemente un método estándar, sencillo y unificado capaz de tratar, sin cambios fundamentales con todos los casos de la termodinámica (clásico, cuántico...) y cada nuevo problema que pueda surgir. El interés está enfocado hacia el desarrollo de un procedimiento general y los ejemplos son tratados como ilustraciones del mismo.
b) Problema, Pregunta, Propósito	Dar un significado preciso al postulado de Clausius con referencia a la 2ª Ley, a saber: si el calor fluye por conducción desde un cuerpo A a otro cuerpo B, entonces una transformación cuyo único resultado final sea el de transferir calor desde B a A es imposible.	Presentar las consideraciones más esenciales en la ciencia de la termodinámica.	Dar una respuesta desde la mecánica cuántica al problema de la termodinámica estadística: la distribución de una cantidad dada de energía E sobre N sistemas idénticos o determinar la distribución de un conjunto de N sistemas idénticos sobre los posibles estados en los cuales este conjunto se puede encontrar a sí mismo, dado que la energía del conjunto es una constante E
c) Descripción Conceptual. Definición de la ley, noción o concepto descubierto, desarrollado o ampliado.	La 2ª Ley elimina la posibilidad de construir una máquina de movimiento perpetuo. Clausius: Una transformación cuyo único y final resultado sea transferir calor de un cuerpo a una temperatura dada a un cuerpo a una temperatura más alta es imposible.	2ª Ley en forma axiomática: 1ª Parte. Todos los sistemas termodinámicos poseen una propiedad llamada entropía. Se calcula imaginando que el estado actual del Sistema se dio por intercambio de otro estado seleccionado a través de una secuencia de estados de equilibrio y sumando los cocientes de las cantidades dQ introducidos en cada paso y la temperatura absoluta. 2ª Parte. Durante un proceso real (no ideal) la entropía de un sistema aislado aumenta S es una propiedad	$S = \Psi + \frac{U}{T}$ $\Psi = k \log Z, \quad Z = \sum_L \exp(-\epsilon_L / kT)$ <p>donde <math>\Psi</math> es la función termodinámica tanto para cambios de temperatura y de parámetros (v...) y Z es el número de permutaciones que cumplen ciertas restricciones</p>
d) Estrategias de Desarrollo. Método seguido (Apoyos matemáticos y sentido matemático).	Utiliza Ciclos de Carnot para cualquier transformación que ocurre en un sistema aislado, la entropía del estado final nunca puede ser menor que la entropía del estado inicial.	S es conjugada de T. Es una propiedad del sistema independiente de la trayectoria entre el estado inicial y final y depende sólo de los valores instantáneos de la propiedad T, y si las propiedades iniciales se fijan en un estado arbitrario.	Hace uso de conceptos asociados a la mecánica cuántica
e) Explicación de la 2ª Ley y/o de la entropía. (Sentido físico)	Cuando un sistema aislado está en el estado de máxima entropía consistente con su energía, no puede sufrir ninguna otra transformación porque cualquier transformación disminuirá la entropía. Entonces, el estado de máxima entropía es el más estable para un sistema aislado.	El término entropía significa transformabilidad. La 2ª Ley adscribe una dirección definida a fenómenos naturales que en su esencia consiste en la declaración de que la energía tiende a degradarse o, en otras palabras, la esencia consiste en la existencia de la entropía y en la imposibilidad de su disminución bajo condiciones bien definidas.	Número de diferentes microestados que no difieren para el observador macroscópico, porque todos concuerdan con las únicas propiedades macroscópicas que pueden ser observadas por él.

**FIGURA 2.11b Campo de Conceptualización: Continuadores**

Enfocados en el punto de nuestro interés relacionado con la evolución de la entropía; la manera de percibirla, definirla, presentarla y explicarla por parte de los constructores, resultan ser los aspectos de importancia que se destacan en los cuadros.

Lo que a primera vista resalta para la Segunda Ley es que, fuera de Clausius y Boltzmann, que sí plantean un vacío en el campo de la termodinámica, el resto se limita a re-formular los planteamientos originales. Esto puede explicarse porque, una vez que con Clausius (Kelvin y otros) las bases para la termodinámica se sientan, (y Boltzmann se retira del campo macroscópico), la termodinámica clásica entra en la etapa normal de la evolución Kuhniana del paradigma en la que se busca más la aplicación, la ampliación y la consolidación de los logros, que el cuestionamiento a aquellos. Es decir la mirada “cargada con **esa** teoría” sólo “ve” lo que *puede ver*, sin dudas ni cuestionamientos. La *significación perceptual* está pre-grabada y la *mirada pre-significada*. No es posible entonces percibir vacíos en campos que se “ven como” completos. La trama disciplinaria con los sentidos que porta queda estática.

Como tarea, para los que suscriben el paradigma en su etapa normal, solo resta afinar los razonamientos, las estrategias de prueba y/o precisar las leyes y conceptos<sup>29</sup>. La interpretación anterior se confirma al observar las tareas que desarrollan los continuadores en la Figura 2.11b.

A partir de Planck, las descripciones de leyes y conceptos de la termodinámica clásica son reiteraciones de las descripciones y definiciones de Clausius y Kelvin, sin más modificación que las diferentes presentaciones: como “proposiciones de prueba” (Planck), como axiomas (Sommerfeld), como la reformulación o reinterpretación de la segunda ley como la imposibilidad de las máquinas de segundo tipo (Planck), planteando la segunda ley en términos de la entropía (Planck, Sommerfeld) o considerando a la entropía como propiedad (Fermi, Sommerfeld).

La posición de Schrödinger de “contar el número de microestados que no difieren para el observador macroscópico porque concuerdan con las propiedades macroscópicas que son las que puede observar” (Apéndice p. 89) está más cercana al conteo de Boltzmann en el campo microscópico.

---

<sup>29</sup> Esta tarea la lleva a cabo con gran éxito J. Willard Gibbs, a quien se debe una gran parte de la formulación de la termodinámica actual.

Adicionalmente, desde nuestro marco teórico se explica el que el refinamiento matemático se vuelva indispensable, porque se “*ve como*” una necesidad para la “etapa normal”, el ir cada vez más ampliando las posibilidades de explicación y aplicación del paradigma (teoría o trama disciplinaria) en situaciones concretas.

Específicamente, la segunda ley aunque continua siendo expresada en los términos clásicos de Carnot de máquinas imposibles, el enunciado de Clausius relacionado con la imposibilidad de que se transfiera espontáneamente calor de un cuerpo frío a uno caliente, se empieza a considerar como axioma (Sommerfeld) y gana terreno la enunciación de la Segunda Ley en términos de la entropía como lo propuso Planck.

De las Figuras 2.11a y b, apreciamos dos tipos de *significaciones perceptuales* uno, derivado de una “carga matemática” en la mirada (Boltzmann, Schrödinger) y el otro, derivado de una “carga física” que se origina a partir de lo observado (Clausius, Kelvin, Planck). Adicionalmente, percibimos al menos dos enfoques predominantes en la *significación disciplinaria* y en el sentido físico que se otorga a los conceptos: un enfoque cuantitativo y otro cualitativo.

El enfoque cuantitativo aparece más en Boltzmann y Schrödinger, cuando la preocupación se concentra en el problema matemático del conteo del mínimo de permutaciones, o en el conteo del número de microestados.

El enfoque cualitativo (o quizás más propiamente mixto) se encuentra en Clausius y Planck cuando describen a la entropía, Clausius, como “una transformación no compensada” y como un indicador del “valor de transformación de los cuerpos”. Planck como “la direccionalidad que la entropía adscribe a los procesos naturales”.

De lo anterior se desprenden dos interpretaciones o significaciones físicas para la entropía dentro de la termodinámica clásica: aquella con Clausius que la relaciona con la energía en su cantidad y cualidad, y aquella otra con Planck, que le otorga, como carácter principal, la determinación de la posibilidad o imposibilidad de los procesos naturales.

Por su importancia, otros constructores-continuadores serán considerados en este capítulo en el que describiremos brevemente los trabajos de Gibbs y Carathéodory.

## 2.6 Otros Constructores-Continuadores: Gibbs, Carathéodory

### 2.6.1 Joshua Willard Gibbs<sup>30</sup>

J. Willard Gibbs desarrolló su trabajo en la termodinámica que se está estudiando, en los años 1873-1878, periodo en el cual se centró en la descripción de “estados de equilibrio” y no en los “procesos” que hasta entonces habían constituido el punto de interés de Kelvin, Clausius y Planck. Para ello, considera que tales estados están completamente caracterizados por un número finito de variables de estado como son la temperatura, energía, presión, volumen, entropía, potenciales químicos, etcétera.

La existencia de estas cantidades Gibbs las da por sentadas y no intenta probarlas a partir de principios empíricos.

Gibbs plantea el siguiente principio: (Uffink, 2001, p. 359): “Para el equilibrio de cualquier sistema aislado es necesario y suficiente que -todas las variaciones posibles del estado del sistema las cuales no alteren su energía-, la variación de su entropía sea nula o negativa”.

Este principio también se expresa como  $(\partial S)_u \leq 0$  donde  $u$  es la energía

A este principio se le conoce como el principio de entropía máxima y como otra formulación de la segunda ley.

Los avances logrados por Gibbs dentro de la termodinámica, son resaltados por Moulines (1990) quien los considera tan importantes que los equipara a los conseguidos por científicos

---

<sup>30</sup> Para este desarrollo se seguirán los trabajos de: Moulines V. (1990) y el trabajo de Uffink, J. (2001). Estos autores a su vez se basan en Gibbs, J.W. (1961) The Scientific Papers of Willard Gibbs. Dover.

como Newton, Darwin o Euclides (Moulines, 1990, p. 8). Esos avances son enumerados por Moulines quien aludiendo al primer trabajo (“Graphical...), de este autor, subraya que Gibbs:

- Inaugura la termodinámica gráfica haciendo uso de diagramas  $V - S$  en lugar de los diagramas  $P - V$  tradicionales
- Establece por primera vez la ecuación fundamental  $du = Tds - pdv$ .

En palabras de Gibbs:

“Las propiedades termodinámicas de un fluido están determinadas por las relaciones que existen entre el volumen, presión, temperatura, energía y entropía de una masa dada de un fluido en un estado de equilibrio termodinámico. Lo mismo es válido para un sólido [...] todas las relaciones existentes entre estas cinco cantidades para cualquier sustancia (tres relaciones independientes) pueden ser deducidas de la sola relación existente para la sustancia entre el volumen, la energía y la entropía. Esto puede ser hecho por medio de la ecuación general  $du = Tds - pdv$

- Introduce en el lenguaje de la termodinámica los términos: ecuación fundamental, función de estado, isentrópico, trayectoria, fase, potencial químico...

Del tercer trabajo (“On the Equilibrium...), pero tomando en cuenta los trabajos primeros:

- Establece una trayectoria general de equilibrio (termodinámica del equilibrio), para cualquier clase de sustancia incluyendo mezclas, y para cualquier tipo de sistema incluyendo sistemas compuestos.

Generaliza sus análisis previos y obtiene:  $du = Tds - pdv + \sum_{j=1}^n \mu_j dM_j$

- propone los principios extremos: el máximo valor de la entropía se obtiene cuando la energía se mantiene constante, y el valor mínimo de la energía cuando la entropía se mantiene constante. Los dos principios son equivalentes.
- Introduce los términos energía disponible y energía libre planteados como nuevas funciones termodinámicas:

$$F = U - TS$$

$$H = U + PV$$

$$G = U - TS + PV$$

Ahora conocidas como:

Función de Helmholtz

Entalpía

Función de Gibbs

Los avances anteriores, que no agotan sus aportes, justifican el que se contemple aquí como uno de los constructores no de la entropía pero si de la termodinámica con una indiscutida influencia en autores posteriores.

### 2.6.2 Constantin Carathéodory<sup>31</sup>

Constantin Carathéodory afirma Uffink (2001), fue el primer matemático que trabajó sobre la termodinámica para conseguir una formalización rigurosa. Estableció en 1909 una nueva versión para la segunda ley. Su propósito era el de desarrollar la teoría de tal manera que la segunda ley proporcione una característica de la estructura matemática del espacio de estados. Es decir,

Carathéodory siguió a Gibbs en la idea de que la termodinámica debería ser constituida como una teoría de estados de equilibrio en lugar de procesos (cíclicos). Un sistema termodinámico está descrito por un espacio  $\Gamma$  consistente de sus posibles estados, los cuales están representados por  $n$  variables de estado. Se supone que este espacio de estados puede ser representado como un subconjunto de un espacio  $n$ -dimensional en el que estas variables termodinámicas de estado sirven como coordenadas. Carathéodory supone que el espacio de estados está equipado con la topología euclidiana estándar aunque las propiedades métricas del espacio no juegan ningún papel en la teoría. (Uffink, 2001, p. 362).

Carathéodory distingue entre coordenadas que llama “térmicas”, como la temperatura y la energía, y las de “deformación”, como el volumen. De su desarrollo parece desprenderse, dice Uffink, que las primeras son las apropiadas para describir estados de equilibrio y las segundas para describir sistemas en estados de no equilibrio.

El concepto fundamental en Carathéodory está en la noción de “accesibilidad”, y en la relación entre parejas de estados “ $s$ ” y “ $t$ .” ( $s < t$ ), que representa si el estado “ $t$ ” puede ser alcanzado a partir del estado “ $s$ ” en un proceso adiabático. La relación de accesibilidad entre estados se tomará como  $s < t$ <sup>32</sup>

---

<sup>31</sup> Para la descripción de su trabajo seguiremos a Uffink (2001) ya citado, quien se basó en Carathéodory, C. (1909).

<sup>32</sup> La relación de accesibilidad entre estados Uffink lo denota por  $s_1 < s_2$  siguiendo a su vez la notación propuesta por Lieb y Yngvason en su trabajo: (1999), pp. 1-96

### Principio de Carathéodory

En palabras, “en cada vecindad abierta  $U_s$  (contenida en el espacio de todos los estados,  $\Gamma$ ) de un estado  $s$  arbitrariamente escogido, existen estados  $t$  tales que para una vecindad abierta  $U_t$  de  $t$ , todos los estados  $r$  dentro de  $U_t$  no pueden ser alcanzados adiabáticamente a partir de  $s$ ”. De manera análoga a lo mencionado para Gibbs, se destacan los logros obtenidos por Carathéodory:

- fue el primero en introducir el concepto de temperatura empírica, antes del tratamiento de la primera y segunda ley.
- a ese principio empírico, se le llamó la “Ley Cero de la Termodinámica”<sup>33</sup>.
- su introducción a la primera ley es de mayor rigor que la planteada por otros desarrollos.
- proporciona un formalismo matemático riguroso y diferente.

## 2.7 Comentarios y Discusión

Los trabajos reseñados no están exentos de críticas, por ejemplo Uffink (2001, p. 360) señala como una limitación del principio de Gibbs el que “solo nos diga cuando un estado concebible es estable y el que dicho principio no contenga información acerca de las evoluciones (reales y no virtuales) de los estados con el tiempo. Uffink (2001, p. 361) concluye que desde Gibbs no se obtiene la validez universal del principio de la entropía, “como si se obtiene a partir de otras aproximaciones como la de Planck”.

En cuanto al trabajo de Carathéodory, de él se ha criticado (Uffink, p. 367), su alta abstracción y el que no haga referencia alguna a la imposibilidad de generación de un movimiento perpetuo de segunda clase, al punto que hace que Planck en 1926 se pregunte si el principio de Carathéodory tiene contenido empírico alguno. Lo anterior quiere decir que si el principio de Carathéodory es puramente una proposición local entonces es muy débil para garantizar la existencia de una función entrópica global.

---

<sup>33</sup> Aunque nuestro propósito fundamental se centra en el estudio de la segunda ley, enunciamos brevemente que la tercera ley debida a Nerst en 1905, es planteada por Planck en términos de la entropía de la siguiente manera: “el valor absoluto de la entropía de un líquido o sólido puro, se aproxima a cero en 0K”.

Las críticas aquí enunciadas para Gibbs y Carathéodory, no son ni las únicas ni las definitivas. El propio Uffink rebate algunas dirigidas a Carathéodory. En este trabajo no se abundará en ello, pues se sale de nuestros propósitos. Lo que sí procede es que comentemos lo anterior con el marco elegido.

Los trabajos de Gibbs y Carathéodory son presentados de manera sucinta por Moulines (1990) y Uffink (2001) quienes no ocultan su simpatía hacia Gibbs y Carathéodory respectivamente<sup>34</sup> pero, lo que se desea resaltar son los acercamientos que cada uno realizó hacia la termodinámica y decidir su lugar en la evolución de la segunda ley y del concepto de entropía.

Tanto Gibbs como Carathéodory, “*ven*” a la termodinámica “*como* un campo que puede ser construido como una teoría de estados en equilibrio renunciando de esa manera a ocuparse del cambio en los estados (procesos) que constituyeron el material de estudio de los fundadores.

Gibbs como físico teórico, y Carathéodory como matemático, se mueven en el extremo abstracto del campo de conceptualización (Figura 2.1), con el fenómeno real como referente lejano y sobre entendido.

La abstracción de Gibbs enriquece a la termodinámica (quizás más propiamente dicho a la termoestática), pero no compartimos la idea de que con su trabajo “nazca la termodinámica clásica” como asegura Moulines (1990, p. 13), quien, disminuye todo lo anteriormente hecho por los otros constructores. Así, califica al desarrollo de Gibbs como “un pico en la historia de la ciencia”, como “un paradigma, una matriz disciplinaria, un ideal del orden natural, el núcleo duro de un paradigma de investigación y el elemento teórico básico de una evolución de teoría, todas a la vez”.

Al respecto, nosotros consideramos que el trabajo de Gibbs fortaleció la tradición quizás incipiente pero ya existente e iniciada con Carnot, Clausius y otros. Lo que sí puede afirmarse

---

<sup>34</sup> Creemos que la presentación de uno y otro puede equilibrar en alguna medida mi selección-presentación hasta donde mi propia significación interesada me lo haya permitido.

es que con Gibbs se obtienen los elementos para que la termodinámica se consolide como tal y se inaugure la fase de “ciencia normal”.

Gibbs y Carathéodory son constructores que, a diferencia de los pioneros fundadores, otorgan sentido a los conceptos construidos no a través de la significación empírica sino a través del formalismo matemático con el que los derivan. Lo anterior los ubica dentro de la corriente logicista del enfoque lógico-empirista (Figura 1.6).

Innegablemente, Gibbs ejerció una influencia poderosa en los escritos posteriores a sus aportes, aún sobre las del propio Carathéodory. En efecto, las construcciones de los fundadores, empíricos y logicistas, son tan de base que se constituyen en las referencias obligadas de todos los autores que tratan aspectos de la termodinámica.

Por último mencionaremos que en ninguno de los autores revisados, incluyendo a Boltzmann, se ha encontrado algún planteamiento directo y explícito para la entropía, que concuerde con la proposición con la que ahora se define a la entropía, esto es como “la medida del desorden”.

En el Capítulo 3 buscaremos el origen de esta definición e identificaremos otras interpretaciones para la entropía, a partir de la revisión de una muestra de autores de libros de texto dentro de la categoría que hemos llamado “Difusores”.

**VERTIENTE EDUCATIVA.  
REPRESENTACIONES DE LA ENTROPÍA E IMPLICACIONES PARA  
SU ENSEÑANZA**

### **CAPITULO 3 LOS DIFUSORES-AUTORES DE LIBROS DE TEXTO. DEFINICIONES Y REPRESENTACIONES DE LA ENTROPIA**

En el capítulo anterior se han revisado obras de autores que han sido considerados del grupo que hemos llamado constructores y continuadores

De los últimos, la generalización y reformulación de la segunda ley en términos de la entropía debida a Planck<sup>35</sup> (1945), quien enfatiza explícitamente que su formulación “es la única que se enuncia sin restricción alguna”, puede considerarse como aporte, entre otros, al campo de la termodinámica. Con ella, Planck introdujo el fenómeno de la irreversibilidad de los procesos naturales, como el elemento esencial de la segunda ley. Como constructor, su Tratado... (1945) ha dejado huella en los estudiosos de la termodinámica pues fue reeditado más de diez ocasiones, abarcando un periodo superior al medio siglo.

Asimismo, siguiendo la “mirada” de los difusores, se toma en cuenta una muestra de libros de texto en los que se destacan como puntos de análisis: *la presentación de la segunda ley así como el desarrollo y las definiciones adoptadas para el concepto de entropía*. Esto es, se enfatiza el seguimiento del contenido disciplinario que sustenta la concepción y el desarrollo de la entropía.

Posteriormente, se revelan los acuerdos o desacuerdos de los autores de los textos con los fundadores-constructores, para apreciar la evolución de los conceptos mencionados a partir de nuestro marco de interpretación.

Para organizar la presentación de esta parte del trabajo hemos propuesto la clasificación de los autores como se presenta en la Figura 3.1.

---

<sup>35</sup> “Cada proceso físico o químico que ocurre en la naturaleza procede de tal manera que la suma de las entropías de todos los cuerpos que participan de cualquier manera en el proceso aumenta o permanece constante. En el caso límite para procesos reversibles, esta suma no cambia”. Por tanto, dice Planck, no hay otra medida para la irreversibilidad de un proceso que la cantidad de aumento de entropía.

CONSTRUCTORES FUNDADORES		CONTINUADORES	DIFUSORES LIBROS DE TEXTO	
EMPIRISTAS	LOGICISTAS		NIVEL UNIVERSITARIO	NIVEL MEDIO SUPERIOR
Clausius (1862)	Boltzmann (1892) Gibbs (1875-1878)	Planck (1904) Fermi (1936)	Planck (1904-...1945) Fermi (1936) Smith (1952) Sommerfeld (1956) Resnick (1ª Ed. 1960) Feynman (1964) Reif (1964) Bent (1965) Wilson (1966) Fast (1970) García Colín (1972) Piña Garza (1972) Kestin (1976) Chue (1977) Díaz Peña (1979) Pippard (1981) Morris (1982) Callen (1985) Serway (1987) Abbott & Vanness (1991) Canales et. al (1999) Resnick (2002)	Alvarenga (1976)  Hewitt (1995)

**FIGURA 3.1 Clasificación de los Autores**

Describiendo brevemente la figura, han sido considerados como *constructores* fundadores a Clausius y Gibbs. Boltzmann, se ubica como fundador de la mecánica estadística. Son *continuadores* aquellos autores que trabajan dentro de la fase de “ciencia normal” del paradigma de la termodinámica; y llamamos *difusores* a los que se ocupan de hacer del conocimiento de un mayor número de personas los tópicos fundamentales de la termodinámica. Como difusores se ubican los autores de libro de texto, y al lado de ellos ubicamos también a los profesores<sup>36</sup>, quienes tienen la responsabilidad de mediar entre el conocimiento disciplinario y su construcción-apropiación por parte del alumno.

Para nuestro estudio de autores-difusores con obras relacionados con la termodinámica, y pensando particularmente en la entropía, hemos seleccionado una muestra que consideramos cercana a los libros de texto de termodinámica que han sido y continúan siendo de amplia utilización en México y que abarcan el periodo de más de un siglo que estamos estudiando.

<sup>36</sup> Estamos conscientes de que la actividad docente supera con amplitud la categoría de “difusores” en la que aquí se ubica a los profesores. Tomamos esa licencia metodológica para fines de organización y análisis de los sujetos en estudio.

Hasta ahora se han revisado los trabajos correspondientes a los Constructores Fundadores y las de los Continuadores. Desde nuestro marco teórico se ha argumentado a favor de la importancia que ha jugado el “*ver como*” o la *percepción significada* en los constructores para la detección de vacíos, planteamiento de nuevos problemas y creación de conceptos portadores de nuevos sentidos disciplinarios. Los Continuadores, desde una *percepción pre-significada* por el paradigma asumido, afinan, aplican y prueban la potencia del paradigma en la resolución de problemas, centrando su trabajo en lo que Moulines llama “puzzle-solving” (citado en Perez, 1999, p. 37).

Los Difusores, a su vez, tienen como propósito principal la inteligibilidad del material disciplinario que presenten a sus lectores y/o aprendices. Para ello tienen que realizar un cuidadoso escrutinio de los conocimientos, aplicaciones y problemas que han surgido de los constructores fundadores y continuadores y plantearse como mínimo - se piensa en los autores de libros de texto- el dar respuesta a preguntas relacionadas con el *qué*, el *para qué*, el *cómo* y el *con qué*, antes de iniciar su obra.

El “*qué*” está constituido por el conocimiento acumulado-construido en la disciplina a partir del cual, cada autor tiene que seleccionar el contenido del texto; el “*para qué*” ya está predeterminado y surge de la intención de difundir ese conocimiento elegido; en el “*cómo*”, que se refiere a la presentación del contenido, la inteligibilidad para el lector debe ser la norma y en el “*con qué*” el autor debe optar por la utilización de aquel o aquellos razonamientos y herramientas teórico-matemáticas, prácticas y metodológicas que se adecuen de la mejor manera y sean consistentes con las respuestas a las otras preguntas.

La *percepción significada* aparece nuevamente en juego en cada autor- difusor, y conforme a ella, contestará las preguntas planteadas de acuerdo a su formación, posiciones epistemológicas y educativas, conocimientos, experiencias, creencias, intereses personales, afinidades o simpatías...<sup>37</sup>

Pese a todo lo que puede influir en el “*ver qué*” del autor, es el propio campo disciplinario el que impone los límites. Si nos enfocamos (porque ese es nuestro interés y lo que significa nuestra

---

<sup>37</sup> Por brevedad no se enumeran otros factores que pueden intervenir en las elecciones del autor como son los relacionados con los apoyos económicos y socio-políticos, necesidades curriculares, estudiantiles, disponibilidad y tiempos para cursos escolares...

mirada) sólo en la presentación y desarrollo de la segunda ley y de la entropía que realizan los difusores, la gama de alternativas entre las cuales pueden los autores decidir, no es muy extensa pues están prefijadas por los trabajos de los constructores.

Con base en la muestra de los textos en este capítulo, identificamos las elecciones realizadas por los autores en contenido y método, es decir: se resaltan los *sentidos disciplinarios* (definiciones) mas favorecidos para la entropía y se rastrean sus orígenes para, en un segundo momento, destacar el *qué* y el *por qué* de los cambios que el concepto de entropía pudiera haber tenido en los libros de texto, con respecto al sentido disciplinario construido por los fundadores. De manera análoga a lo realizado en el Capítulo 2 la información, o más bien parte de ella, se concentrará en Cuadros presentados en la Figura 3.2.

En lo que sigue, se atenderá más la discusión del sentido físico de la descripción explícita del concepto de entropía y de la segunda ley que presenten los autores de texto, que a la deducción o desarrollo matemático utilizado.

### 3.1 La Muestra de los Libros de Texto

Está constituida por 24 textos (incluyendo los de Planck, Fermi y Sommerfeld que fueron revisados en el capítulo anterior). De los textos escogidos, dos corresponden a libros de texto que están orientados hacia el nivel medio superior (preparatorio y propedéutico para estudios del nivel universitario) y el resto está dirigido hacia el nivel universitario para el que, con García-Colín (1972, p.5), se da por sentado “que el lector está familiarizado con el material cubierto en los cursos convencionales de física y de matemáticas de los primeros años o semestres de dichas escuelas profesionales (se refiere a las carreras técnicas o científicas para las que dirige la obra), como son: mecánica, ondas, calor, electricidad y magnetismo y maneja el cálculo diferencial e integral “. Estos requisitos señalados en particular para el texto de García Colín pueden generalizarse para el resto de los libros universitarios.

Por otro lado, se señala como subclasificación, que los textos de Reif, (1965) y Díaz Peña (1979) tienen un enfoque estadístico; los textos debidos a Serway (1987), Feynman (1965) y Resnick (1966-2002) y los del nivel pre universitario, Alvarenga (1976) y Hewitt (1995), son libros de Física General. Los libros de texto de Morris (1982) y Canales (1999) son de

Fisicoquímica y los demás textos de los autores Smith (1952), García-Colín (1972), Chue (1977), Piña (1978), Pippard (1981), Serway (1984), Callen (1985) y Abbot & Vanness (1991)<sup>38</sup>, son de Termodinámica.

La diversidad de los textos escogidos obedece al hecho de que la termodinámica, como rama importante de la física, forma parte necesariamente del contenido de los textos de física con un enfoque general pero también aparece en textos de índole aplicada que hacen uso de las leyes y principios de la termodinámica como los de ingeniería (que no revisaremos aquí) y aparece también en obras bidisciplinarias como los de fisicoquímica y otros. Con relación a los libros de física general, en algún momento se dudó de la pertinencia de su inclusión, pero se decidió en sentido positivo porque son los textos generales los que tienen influencia en los estudios propedéuticos del nivel medio superior y de ellos se adquieren las primeras definiciones conceptuales y algunos de los elementos con los que los alumnos construyen explicaciones y las *ideas previas* que portan al incorporarse a los estudios universitarios más especializados. Parte de la información recogida -necesariamente reducida a lo esencial- sobre el concepto de entropía dentro de las diferentes obras se muestra en las Figuras 3.2a y b (obras referidas a la termodinámica), 3.3 (referida al texto de Reif), 3.4 (correspondientes a los textos de física general), y 3.5 (correspondientes a los textos de fisicoquímica). De algunos libros sólo se destaca la caracterización de la entropía para no repetir lo ya señalado en otros textos y no se presentan en los concentrados.

Para la presentación –en analogía con la información revisada para los constructores- de este Capítulo se resalta en las Figuras y para cada texto lo relacionado con el desarrollo o antecedentes de la 2ª Ley y la entropía, sus definiciones o formulaciones y enseguida, con base en esa información, complementada con la de los propios libros de texto, efectuar la lectura de ese material comparándolo con los desarrollos provenientes de los fundadores y realizar su análisis a partir de las nociones provenientes de nuestro marco teórico.

---

<sup>38</sup> Los diez libros de Termodinámica incluyen los reseñados en el Capítulo 2.

AUTOR	ANTECEDENTES Y DESARROLLO	FORMULACIONES DE LA 2ª LEY	ENTROPIA
Pippard, pp. 38-48, pp. 11-115 (Termodinámica)	<p>Ciclo de Carnot, desigualdad de Clausius. Introduce la justificación de entropía por medio de la definición</p> $S_B - S_A = \int_A^B dQ/T$ <p>Para cambios reversibles S es una función de estado completamente determinable una vez que se ha fijado su valor para un estado particular del sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Clausius, Kelvin, Carathéodory</li> <li>No es posible variar las restricciones de un sistema aislado de tal forma que disminuya la entropía</li> </ul>	<p>La entropía (y otras funciones termodinámicas) deberán considerarse como una propiedad del sistema y de sus restricciones, y una vez fijadas éstas, también la entropía está fijada.</p>
Piña Garza, pp. 69-76 (Termodinámica)	<p>Un Ciclo de Carnot reversible da la ecuación</p> $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$ <p>que relaciona los calores transmitidos y las temperaturas entre las cuales opera el Ciclo.</p> <p>Un ciclo reversible más complicado se puede formar mediante una combinación de Ciclos de Carnot y se cumple <math>\sum Q/T = 0</math></p> <p>Su generalización: <math>\int \frac{dQ}{T} = 0</math></p> <p>Esta ecuación asegura que existe una función de estado del sistema, tal que su diferencial exacta es <math>dS = dQ/T</math></p> <p>A la función S se le llama entropía.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Para cualquier transformación adiabática, la entropía del estado final siempre es mayor que la del estado inicial</li> <li>La entropía de un sistema se puede reducir valiéndose de un sistema exterior y a costa de aumentar la entropía del exterior.</li> </ul>	<p>Un sistema aislado del exterior es aquel en que la pared externa posee todas las restricciones posibles. Cuando se suprime una restricción interna, la entropía del sistema no disminuye sino que, en general aumenta.</p> <p>Si desaparecen todas las restricciones internas de un sistema aislado del exterior, se habrá alcanzado la máxima entropía y el estado más estable</p>
García Colín, pp. 73-84 Termodinámica	<p>Si se ponen a operar una serie de máquinas de Carnot con diferentes sustancias operantes entre dos fuentes térmicas a temperaturas <math>\theta_2</math> y <math>\theta_1</math>, <math>\theta_2 &gt; \theta_1</math>, entonces independientemente de cual sea el sistema operante o la forma del ciclo, la relación <math>Q_2/Q_1</math> para cada una de estas máquinas tiene el mismo valor numérico, lo que implica que <math>Q_2/Q_1</math> debe ser función nada más de las temperaturas de las fuentes, esto es <math>Q_2 = f(\theta_2, \theta_1)</math></p> <p>y finalmente <math>Q_2/Q_1 = T_2/T_1</math></p> <p>Para la entropía: sea <math>\sigma</math> (un sistema) que opera en ciclos entre n recipientes térmicos a temperaturas <math>T_1, T_2, \dots, T_n, \dots</math>, entonces <math>\sum_{i=1}^n Q_i/T_i \leq 0</math></p> <p>Pasando de una distribución discreta de fuentes a una continua, se tiene que:</p> $\oint dQ/T \leq 0$ <p>donde <math>\oint</math> representa la integral realizada sobre todo el ciclo y dQ la cantidad de calor intercambiada entre <math>\sigma</math> y la fuente a la temperatura T. Si el ciclo es reversible <math>\oint dQ_{rev}/T = 0</math> y en este caso T es indistintamente la temperatura del sistema o de la fuente</p>	<p>La transformación de trabajo en calor es un proceso que puede ocurrir sin limitación alguna. Pero la experiencia dice que el proceso inverso solamente es realizable bajo limitaciones muy severas. Esta restricción en la dirección en que un proceso dado puede o no ocurrir en la naturaleza se manifiesta en todos los procesos espontáneos o naturales. La segunda ley generaliza estas observaciones y a través de ella vamos a poder definir una variable termodinámica, la entropía, tal que asociado al cambio de su valor entre dos estados de equilibrio de un sistema, habrá un criterio para decidir si un proceso dado entre dichos estados puede ocurrir o no y bajo que condiciones.</p>	<p>Hemos definido una nueva variable termodinámica, la entropía, de un sistema (S variable extensiva) que como tal es una función de punto y por lo tanto su valor no depende de la trayectoria y por consiguiente, no depende del proceso mediante el cual es alcanzado el estado de equilibrio a que se refiere.</p> <p>Definición de la entropía de A con respecto a 0.</p> $S(A) \equiv \int_0^A dQ_{rev}/T$ <p>Si A y B son dos estados de equilibrio de un sistema <math>\sigma</math></p> $S(A) - S(B) = \int_A^B dQ_{rev}/T$
Planck, pp. 79-99 (Termodinámica)	<p>Si se observa la segunda ley desde un punto de vista matemático, la distinción entre los estados finales e iniciales de un proceso puede consistir solo en una desigualdad. Esto significa que una cierta cantidad que depende del estado momentáneo del sistema, posee en el estado final un valor mayor o menor, de acuerdo a la definición del signo de esa cantidad en el estado inicial.</p> <p>Si un gas perfecto está sujeto a una compresión o expansión infinitamente lenta y si al mismo tiempo se le aplica calor (q), se tiene lo siguiente para cada pequeña porción del proceso, por unidad de masa:</p> $q = du + pdv, \text{ para un gas perfecto } du = c_v dT, \text{ y } p = RT/mv. \text{ Así, } q = c_v dT + RTdv/mv$ <p>integrando esta expresión se obtiene la entropía para un proceso adiabático (q=0).</p>	<p>La segunda Ley de la Termodinámica es esencialmente diferente a la primera ley. No todo cambio que es consistente con la primera ley satisface las condiciones que la 2ª ley impone sobre el proceso. La 2ª Ley establece que existe en la naturaleza para cada sistema una cantidad que para todos los cambios del sistema o permanece constante (en procesos reversibles) o aumenta su valor (en procesos irreversibles). Esta cantidad se llama, siguiendo a Clausius, la <b>entropía</b> del sistema.</p> <p>Ley de Kelvin-Planck</p> <p>Es imposible construir una máquina la cual trabajando en un ciclo cerrado solo produzca como efecto la elevación de un peso y el enfriamiento de una reserva de calor.</p> <p>De existir una máquina así se dispondría de una máquina de movimiento perpetuo.</p>	<p>Todos los procesos que tienen lugar en la naturaleza son irreversibles. Un proceso reversible es solo un caso límite, ideal.</p> <p>El segundo principio de la termodinámica es como el primero, una ley empírica y como tal, puede deducirse a partir de la sola ley de la experiencia acerca de la cual no haya duda.</p>

FIGURA 3.2a El Concepto de la Segunda Ley y de la entropía en diferentes obras (Termodinámica)

AUTOR	ANTECEDENTES Y DESARROLLO	FORMULACIÓN (ES) DE LA 2ª LEY	ENTROPÍA
Chue, pp. 1-30 (Termodinámica)	<p>Utiliza un acercamiento a través del establecimiento de postulados como fue originalmente desarrollado para el estudio de máquinas térmicas. Los postulados no requieren de ser probados. Se toman por verdaderos. Corolarios (de las definiciones de base)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Un cambio de estado está completamente descrito por medio de los valores iniciales y finales de las propiedades primitivas de un sistema. Un cambio ocurre cuando al menos una de sus propiedades primitivas cambia de valor.</li> <li>2. Se requiere un proceso para la determinación de una propiedad derivada.</li> <li>3. El cambio de valor de una propiedad se fija por los estados finales de un sistema que sufre un cambio de estado y es dependiente de la trayectoria.</li> <li>4. Cualquier cantidad fijada por los estados finales de un proceso es una propiedad.</li> <li>5. Cuando un sistema sufre un ciclo el cambio en valor de cualquier propiedad es cero.</li> <li>6. Cualquier cantidad cuyo cambio en un ciclo sea cero, es una propiedad de un sistema.</li> </ol>	<p>Plantea la 2ª Ley en términos de las expresiones de Clausius y Planck.</p> <p>Clausius: Es imposible para un sistema trabajando en un ciclo tener como único efecto la transferencia de calor de un sistema a menor temperatura a otro de mayor temperatura.</p> <p>Planck: Es imposible construir una máquina que trabajando en un ciclo completo produzca como único efecto el elevar un peso e intercambiar calor con un solo reservorio (con esto Planck define una máquina de movimiento perpetuo, clase 2).</p>	<p>La entropía es una propiedad que se desprende de la 2ª Ley (de manera análoga a como la energía es una propiedad desprendida de la 1ª Ley). Esta afirmación es probada a través del Teorema Hatsopoulos – Keenan</p> <p>Teorema: La cantidad <math>dQ/T</math> en cualquier proceso reversible de un sistema representa un cambio en el valor de una propiedad del sistema. Esto es</p> $\oint dQ_{rev}/T = 0$ <p>Como:  <math>S = \int dQ/T</math> donde S es la entropía del sistema.      Para procesos irreversibles cíclicos  <math>S_{irr} dS &gt; \int dQ/T</math>      Para un sistema aislado  <math>\int dS_{irr} &gt; 0</math></p>
Abbot & Vanness, pp. 32-43 (Termodinámica)	<p>La transición de un principio de conservación de la energía limitado a la mecánica, a una ley de conservación completa en la termodinámica, pudo darse cuando se reconoció que el calor es una forma de energía y que la cantidad llamada energía interna es una propiedad intrínseca de la materia. Una vez que esto quedó establecido, el procedimiento que siguió fue la formalización de los principios básicos de la termodinámica en un conjunto de axiomas considerados como válidos desde un principio. La multitud de consecuencias que se desprenden mediante la deducción matemática formal ya han sido ampliamente comprobadas experimentalmente y es inútil que cada estudiante recorra de nuevo esa senda histórica. Las aplicaciones de los axiomas que se presentan conducen a resultados válidos y ninguna otra justificación será necesaria.</p>	<p>Axiomas de la Termodinámica</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existe una forma de energía conocida como energía interna U, la cual es una propiedad intrínseca de un sistema funcionalmente relacionada con las coordenadas mensurables que caracterizan el sistema. Para un sistema cerrado que no está en movimiento, los cambios de esta propiedad están dados por:  <math display="block">du = d'Q - dw</math></li> <li>2. (Primera Ley de la Termodinámica)          La energía total de cualquier sistema y su ambiente considerados como un todo, se conserva.</li> <li>3. Existe una propiedad llamada entropía S, la cual es una propiedad intrínseca de un sistema, funcionalmente relacionada con las coordenadas mensurables que caracterizan el sistema. Para un proceso reversible, los cambios en esta propiedad están dados por  <math display="block">dS = \int dQ/T</math></li> <li>4. (Segunda Ley de la Termodinámica)          El cambio de entropía de cualquier sistema y su ambiente considerados como un todo es positivo y se aproxima a cero para procesos que se aproximen a la reversibilidad. En general:  <math display="block">\Delta S_{total} \geq 0</math></li> </ol>	<p>El Axioma 3 afirma la existencia de la entropía S y proporciona una relación que la conecta con cantidades mensurables.</p> <p>No hay definición explícita para la entropía. La entropía se considera un concepto primitivo.</p> <p>La 2ª Ley es una ley de conservación sólo para procesos reversibles, los cuales son desconocidos en la naturaleza.</p> <p>Todos los procesos naturales son irreversibles y dan por resultado un incremento en la entropía total. La expresión matemática es:  <math display="block">\Delta S_{total} \geq 0</math>      ó <math display="block">\Delta S = \int c_v \frac{dT}{T} + \frac{R}{m} \int \frac{dV_2}{V_1}</math>      para un gas ideal.</p>

FIGURA 3.2b El concepto de entropía en diferentes obras de Termodinámica (Continúa)

AUTOR	ANTECEDENTES Y DESARROLLO	FORMULACIÓN (ES) DE LA 2ª LEY	ENTROPÍA
Frederick Reif Física Estadística (1964) pp. 142-149	<p>Postulados Básicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Un sistema aislado se dice que está en equilibrio si la probabilidad de encontrar al sistema en cada uno de sus estados accesibles es igual e independiente del tiempo.</li> <li>Si un sistema aislado no está en equilibrio tiende a cambiar con el tiempo hasta que alcanza la situación de equilibrio</li> </ol> <p>Sean los sistemas A y A' con energías E y E'</p> <p><math>A^* \equiv A + A'</math> es el sistema combinado aislado y en equilibrio</p> <p><math>E^* = E + E' = \text{constante}</math>. Al plantear ¿Cuál es la probabilidad P(E) de que la energía de A sea E?, se da como respuesta:</p> <p><math>P(E) = \Omega^*(E) / \Omega^*_{\text{total}}</math> ó <math>P(E) = C \Omega(E) \Omega'(E^* - E)</math> donde <math>C = (\Omega^*_{\text{tot}})^{-1}</math> y <math>\Omega</math> es el número de estados accesibles. Puesto que los sistemas tienen muchos grados de libertad, <math>\Omega(E)</math> y <math>\Omega(E')</math> son funciones de E y E' ambas con crecimiento extremadamente rápido. El factor <math>\Omega(E^* - E)</math> decrece rápidamente.</p> <p>Por lo anterior se vuelve conveniente investigar el comportamiento de la función logaritmo de P(E) porque varía más lentamente con E.</p> <p>Entonces: <math>\ln P(E) = \ln C + \ln \Omega(E) + \ln \Omega(E')</math>.</p> <p>En el máximo: <math>\partial \ln P / \partial E = \partial \ln P / \partial E = 0</math></p> <p>que pasa a ser <math>\partial \ln \Omega(E) / \partial E + [\partial \ln \Omega(E') / \partial E'] (-1) = 0</math></p> <p>ó <math>\beta(E) = \beta(E')</math></p> <p>Donde se han introducido las definiciones</p> <p><math>B(E) \equiv \ln \Omega / \partial E = \partial \ln \Omega / \partial E</math>, y la correspondiente para <math>\beta(E')</math></p> <p><math>1/\beta \equiv kT</math> donde T proporciona una medida de la energía en unidades de k y es la temperatura absoluta del sistema bajo consideración. k es la constante de Boltzmann y sus unidades se eligen a conveniencia.</p>	<p>Cuando el sistema está inicialmente ya en el estado más probable permanecerá en equilibrio y su entropía no cambiará. En esta situación se llega a la siguiente formulación: Segunda Ley de Termodinámica.</p> <p>Un macroestado de un sistema puede ser caracterizado por una cantidad S (llamada entropía) que tiene las propiedades siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>En un proceso cuasi estático infinitesimal en el que el sistema absorbe calor dQ, su entropía cambia por <math>dS = dQ/T</math>.</li> <li>En cualquier proceso en el cual un sistema térmicamente aislado cambia de un macroestado a otro, su entropía tiende a incrementarse <math>\Delta S \geq 0</math>, esta relación es significativa porque especifica la dirección en la cual situaciones de no equilibrio, proceden.</li> </ol> <p>La relación anterior permite determinar las diferencias de entropía por mediciones de calor absorbido.</p> <p>La entropía de un sistema es meramente una medida logarítmica del número de estados accesibles al sistema (...)</p> <p><b>La entropía proporciona una medida cuantitativa del grado de desorden (randomness) del sistema.</b></p>	<p>En virtud de las expresiones <math>\beta(E) = \partial \ln \Omega / \partial E</math> y <math>1/T \equiv k\beta</math></p> <p>Se define <math>\partial S / \partial E = 1/T</math> donde se introduce la cantidad S definida por</p> <p><math>S \equiv k \ln \Omega</math> la cantidad S se llama la entropía del sistema en consideración.</p> <p>S tiene las dimensiones de energía porque su definición involucra la constante k cuyas unidades son J/K°.</p>

FIGURA 3.3 El concepto de entropía en diferentes obras (Reif, F.)

AUTOR	ANTECEDENTES Y DESARROLLO	FORMULACIÓN (ES) DE LA 2ª LEY	ENTROPÍA
Alvarenga, pp. 215-225 (Física)	Ciclos de Carnot Máquinas Térmicas Eficiencia o rendimiento de una máquina térmica $e = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ $\dot{O} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ (fuente fría) $\dot{O} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ (fuente caliente)	Si una máquina térmica fuera tal que $Q_2 = 0$ $e = 1$ y se tendría un rendimiento de 100% La 2ª Ley niega que esto sea posible. Kelvin: Es imposible construir una máquina térmica que operando en un ciclo transforme en trabajo todo el calor que se le suministre. La eficiencia de los organismos es del 20%	Cuando un sistema pasa de un estado inicial $i$ a otro final $f$ , la entropía $S$ del sistema es: $\Delta S = \Delta Q/T$ en procesos reversibles $\Delta S = 0$ en procesos irreversibles $\Delta S > 0$ Los procesos naturales son irreversibles por lo que la entropía del Universo siempre está aumentando. Cuando se realiza un proceso irreversible la energía útil se degrada a energía inútil para producir trabajo mecánico. Estadísticamente <b>la entropía se relaciona con el desorden</b> de las moléculas, de las partículas de un sistema. La secuencia estadística muestra que la dirección de desarrollo de un proceso natural se debe a que el sistema tiende a un estado de mayor probabilidad termodinámica que se corresponde con un mayor desorden del sistema con una distribución uniforme en su temperatura y composición, esto es se corresponde con una entropía máxima. La muerte térmica del universo se dará cuando no exista energía útil y la temperatura sea la misma.
Feynman, pp. 44.1-45.3 (Física)	Carnot siendo ingeniero se planteó el problema de cómo construir una máquina mejor y más eficiente, dando lugar a sus estudios de rendimiento. Los resultados de la termodinámica están todos contenidos en ciertas proposiciones llamadas Leyes de la Termodinámica. Ecuación de Boltzmann Si las energías del conjunto de estados moleculares se llaman $E_0, E_1, \dots, E_i$ entonces en el equilibrio térmico la probabilidad de encontrar una molécula en un estado particular que tiene energía $E_i$ es proporcional a $e^{-E_i/kT}$ Esto da la probabilidad de estar en diversos estados. La probabilidad de estar en el Estado $E_1$ relativa a la posibilidad de estar en el estado $E_0$ . $P_1/P_0 = e^{-E_1/kT} / e^{-E_0/kT}$ que es igual a $n_1 = n_0 e^{-(E_1-E_0/kT)}$ pues $P_1 = n_1/N; P_2 = N_2/N$ Así, es menos probable estar en un estado energético más alto que en uno más bajo.	Hipótesis de Carnot (2ª Ley de la Termodinámica): No se puede tomar calor a una cierta temperatura y convertirlo en trabajo sin ningún otro cambio en el sistema o en el medio ambiente. Enunciado de Clausius: El calor no puede por sí mismo fluir de un cuerpo frío a uno caliente. Ambos enunciados son equivalentes. Las Tres Leyes de la Termodinámica: Ley 1 – La energía del Universo es siempre constante. Ley 2 – La entropía del universo siempre está aumentando. Ley 3 – La entropía de cualquier objeto es cero en el cero absoluto.	Trabajando con máquinas reversibles, el calor $Q_1$ a la temperatura $T_1$ es equivalente a $Q_2$ a $T_2$ , si $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ en el sentido de que cuando se absorbe uno, se entrega el otro. Esto sugiere que si le damos un nombre a $Q/T$ , se puede decir que en un proceso reversible se absorbe tanto $Q/T$ como se libera. Este $Q/T$ se llama entropía. La diferencia de entropía entre dos estados, o entropía necesaria para ir de "a" a "b" mediante una transformación reversible es la entropía total. $S_b - S_a = \int_a^b dQ/T$ Se puede decir que hay una cierta función que llamamos entropía de la sustancia que depende solamente del estado, es decir, solamente del volumen y de la temperatura. En un ciclo reversible no hay cambio en la entropía, en los ciclos irreversibles la entropía aumenta, entonces la entropía de todo el universo aumenta en cualquier proceso que es irreversible. En la descripción microscópica de la entropía, si tenemos moléculas blancas y negras ¿de cuántas maneras podemos distribuir las entre cierto número de elementos de volumen de modo que las blancas estuviesen de un lado y las negras en otro? O bien ¿de cuántas maneras podemos distribuir las sin ninguna restricción de dónde va cada una? Claramente hay muchas más maneras de colocarlas en el último caso. <b>Medimos desorden por el número de maneras en que podemos disponer las cosas internamente de modo que parezca lo mismo desde el exterior. La entropía es el logaritmo de ese número de maneras.</b> Con la definición dada para el desorden, en primer lugar la entropía mide el desorden. En segundo lugar el universo siempre va de orden a desorden por lo que la entropía siempre aumenta.
Hewitt, pp. 376 – 389 (Física Conceptual)	Máquinas Térmicas El proceso de transformar calor totalmente en trabajo es imposible. Aún en condiciones ideales no se puede obtener el 100% de rendimiento. La eficiencia ideal depende únicamente de la diferencia de temperaturas entre el suministro de calor y el escape.	El calor jamás fluye espontáneamente de un objeto frío a un objeto caliente. El calor solo fluye en una dirección: cuesta abajo, de lo caliente a lo frío. La 2ª Ley dice que en toda transformación de energía, una porción de la energía se degrada convirtiéndose en energía de deshecho. La energía de deshecho no está disponible para convertirse en trabajo y se pierde. Otra forma de decir esto es que la energía organizada (es decir concentrada y por lo tanto utilizable) se degrada convirtiéndose en energía desorganizada (energía no utilizable). La calidad de la energía se reduce en cada transformación y la energía organizada tiende a desorganizarse. De manera más general la 2ª Ley se puede enunciar de la siguiente manera: Los estados naturales tienden a avanzar a estados más desordenados.	La idea de que la energía ordenada tiende a desordenarse está contenida en el concepto de entropía. La entropía se puede expresar como una ecuación matemática que dice que el aumento en la entropía es $\Delta s = \Delta Q/T$ . <b>La entropía es la medida del grado de desorden.</b> Si el desorden aumenta la entropía aumenta. El orden de los seres vivos puede mantenerse gracias a que la entropía de los otros sistemas aumenta. El sistema viviente debe transformar energía para mantenerse con vida. Cuando deja de hacerlo, el organismo muere y tiende al desorden. La 2ª Ley es una afirmación probabilística. Dado el tiempo suficiente, pueden ocurrir hasta los estados más improbables y la entropía puede a veces disminuir espontáneamente.

FIGURA 3.4 El Concepto de Entropía en Diferentes Obras (Física General)

AUTOR	JUSTIFICACIÓN Y DESARROLLO	FORMULACIONES DE LA 2ª LEY	ENTROPIA
<p>J. Morris, pp. 185-189 (Fisicoquímica) (1982)</p>	<p>La entropía (definida por el símbolo S) es una función de estado, y cualquier cambio en el estado de un sistema se podrá asociar con un cambio en su entropía: <math>\Delta S = S_{\text{final}} - S_{\text{inicial}}</math>. No obstante, a diferencia de la energía, la entropía es esencialmente una función matemática sin ningún análogo físico sencillo.</p>	<p>La termodinámica estadística sugiere que la entropía de un sistema es una medida de la distribución al azar de la energía en el sistema y por eso, asocia la entropía con el número de distintos niveles de energía a disposición del sistema. Este es el origen de los intentos de "explicar" la entropía como una medida del desorden del sistema. Expresado de otra manera, cuanto mayor es el contenido de información de un sistema (orden) menor es su entropía; la carencia de información (desorden) se asocia con un aumento de entropía. Un proceso ocurriría de modo espontáneo sólo si aumenta la entropía neta del sistema cerrado y su ambiente, por lo que se prevé la muerte entrópica del universo: el estado final de equilibrio donde la entropía es máxima y se ha agotado la capacidad de cambio espontáneo.</p>	<p>Se puede imaginar el valor de S de un sistema aislado como un índice de su estabilidad intrínseca. Cuanto más grande es la entropía más estable es un sistema y menor es la capacidad de cambio espontáneo. S – medida de la estabilidad de un sistema. S – medida de la distribución al azar de la energía en el sistema. S – <b>medida del desorden de un sistema.</b></p>
<p>Canales, <i>et. al.</i> pp. 184-200 Fisicoquímica (1999)</p>	<p>Según la 1ª Ley nada impide que sin ayuda externa se extraiga calor del hielo para calentar el agua, pero la experiencia nos enseña que tal transferencia del calor de una temperatura más baja a otra mayor no se efectúa espontáneamente. En su lugar se encuentra siempre que el calor fluye en sentido contrario es decir, el flujo de calor es unidireccional desde la temperatura más elevada a otra menor, lo que no impide la posibilidad de enfriar un cuerpo por debajo de la temperatura de su entorno, pero para ello es preciso realizar cierto trabajo.</p>	<p>Todos los procesos de la naturaleza tienden a cambiar espontáneamente en una dirección que conduzca al equilibrio, en otras palabras, todos los procesos en la naturaleza son unidireccionales porque tienden al equilibrio.</p>	<p>Para llegar a un enunciado general de la 2ª Ley y expresarla en forma matemática, se define una nueva función S denominada entropía del sistema. Aumenta con el calor y explica el comportamiento de los sistemas en cuanto a la transformación de energía. Puede entenderse también como una medida que crece cuando se alcanza una distribución azarosa. La entropía S depende de w que representa la probabilidad termodinámica. El valor numérico de w indica el número de vías diferentes para llegar a un mismo arreglo <math display="block">S = k \ln w</math>La entropía solo depende de los estados inicial y final, por tanto el cambio entrópico es: <math display="block">\Delta S = S_f - S_i</math>y diferencialmente <math display="block">dS = dq_{\text{rev}}/T</math></p>

**FIGURA 3.5 El concepto de entropía en diferentes obras (Fisicoquímica)**

## 3.2 Propuesta de Análisis

### 3.2.1 Los Libros de Termodinámica<sup>39</sup>

Para poder observarlos “significadamente” conviene recordar que es posible presentar la termodinámica desde dos enfoques principales: el postuladorio o clásico y el estadístico.

Figura 3.6

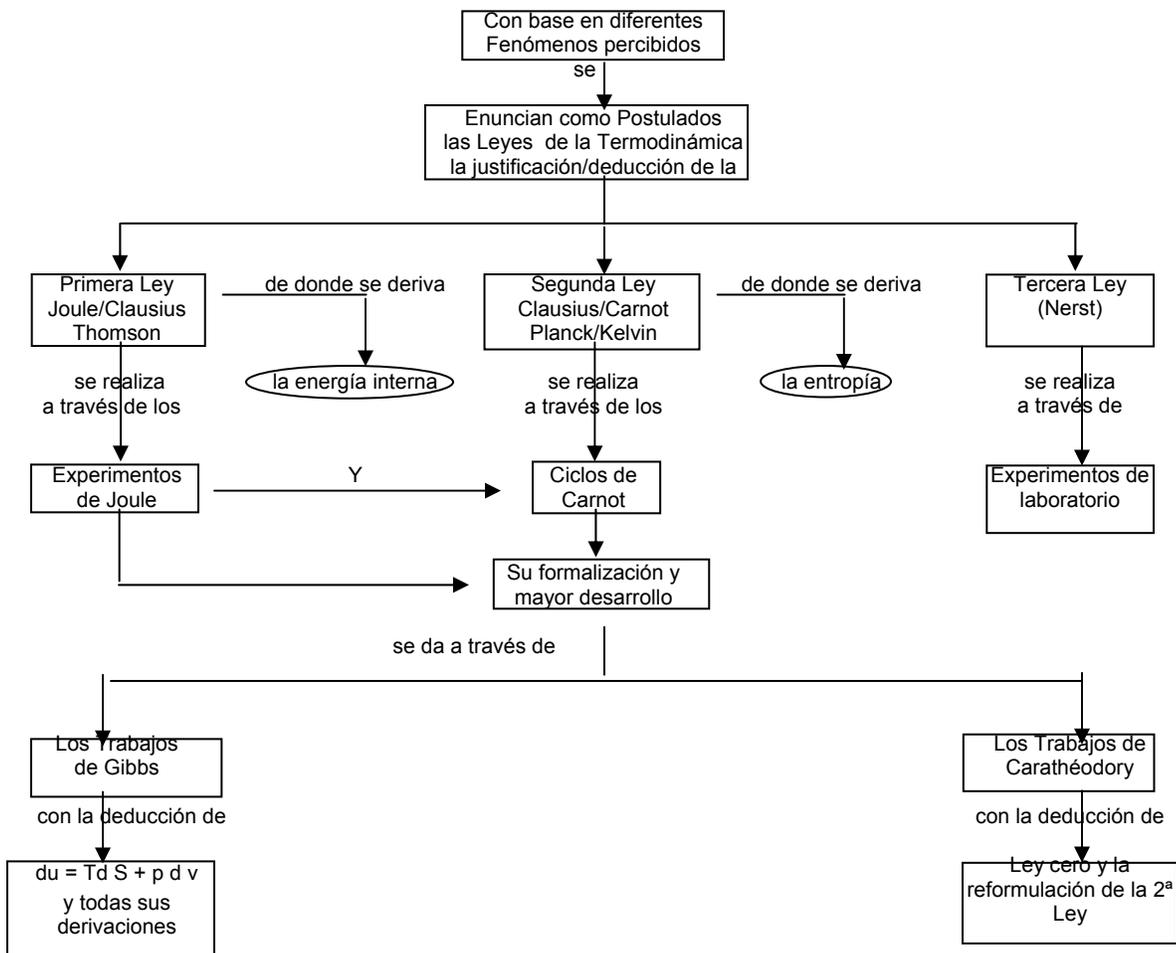


FIGURA 3.6 Enfoque Postuladorio o Clásico para la Termodinámica

<sup>39</sup> Se omiten las de Planck, Fermi y Sommerfeld por haber sido ya comentadas en el Capítulo 2, pero se harán alusiones a ellos cuando proceda.

El enfoque postuladorio, como aclara Chue (1977, p. 1), fue desarrollado para el estudio de las máquinas térmicas, no considera la estructura interna de la materia y desde una perspectiva macroscópica, busca relacionar las propiedades físicas observadas de la materia, a partir de dar por sentados ciertos postulados básicos. El enfoque estadístico, está fundado a su vez en el comportamiento atomístico de la materia y persigue a través de dinámicas moleculares justificar los postulados y otras leyes fenomenológicas que se toman como verdaderas por evidentes en el enfoque postuladorio. En el enfoque postuladorio clásico, las leyes de la termodinámica se formulan partiendo de observaciones y generalizaciones de la experiencia. Su exitosa aplicación a problemas prácticos, las han validado empíricamente (Pippard, 1981, p. 2). Estos dos métodos de construcción y de análisis teórico de la termodinámica: el clásico o fenomenológico y el estadístico, son diferentes entre sí por lo que, en la presentación y desarrollo de la disciplina, los autores de textos de termodinámica deberán optar por uno u otro, o bien desarrollar el texto con un enfoque mixto.

En nuestra muestra encontramos sin sorpresa, que todos los autores de los textos de Termodinámica adoptan el enfoque clásico, excepto el texto de Callen en el que el autor se compromete además, con la presentación de una “Introducción a la Termoestadística”, como aparece en el título de su obra. Debido a ese enfoque mixto, se hace más adelante una presentación más detallada de Callen, pues proporciona explicaciones para la identificación de la entropía con el número de microestados y para la interpretación de la entropía con el desorden.

Los apoyos teóricos para Callen son diversos pero, entre ellos, se reconoce el planteamiento original de Boltzmann, mismo que fundamenta también, junto con conceptos provenientes de la mecánica cuántica, los desarrollos de Reif (1964), Díaz Peña (1979) y los desarrollos de aquellos autores que optan por el enfoque microscópico. Análogamente, con un rigor lógico-matemático diverso, que corre desde Fermi (quien justifica cuidadosamente sus deducciones) hasta Abbott y Vanness (que solo enuncian los axiomas para proceder a su inmediata aplicación), todos los autores<sup>40</sup> de textos de termodinámica con enfoque clásico, reproducen el camino marcado por Clausius y Gibbs.

---

<sup>40</sup> Incluso Abbott y Vanness en la resolución a los ejemplos y ejercicios que presentan.

Con base en la información obtenida de la muestra y presentada en las figuras, se buscará dar respuesta a las preguntas: 1) ¿Qué cambio sufrió la concepción original de Clausius para la entropía? y 2) ¿Por qué cambió esa concepción?, esta segunda respuesta se dará a partir de nuestro marco teórico tratando de construir una explicación razonada y plausible. Las consecuencias de estos cambios constituirán la respuesta a si la evolución del concepto enriqueció o empobreció el concepto original para la entropía de Clausius.

### 3.2.1.1 La Entropía en los Libros de Texto.

Revisando la información de las Figuras 3.2 a la 3.5 y la de los textos no incluidos <sup>41</sup> se confirma que los libros de termodinámica (ver bibliografía) tienen como antecedente fundamental el desarrollo de Clausius en la presentación de la Segunda Ley de la Entropía.

Los textos toman en cuenta también los trabajos de los otros fundadores y siguen muy cercanamente las aportaciones de Gibbs. El orden en el que los fundadores son citados en los libros de la muestra, se presenta a continuación, y se encuentra que está de acuerdo a su aparición histórica a saber:

<b>FUNDADOR</b>	<b>DE ESTE FUNDADOR SE CITA PRINCIPALMENTE:</b>
Carnot	Ciclos, eficiencia...
Clausius	Enunciado de la 2ª Ley Desarrollo para definir la entropía, procesos reversibles e irreversibles...
Kelvin	Enunciado de la 2ª Ley...
Planck	Desarrollo, enunciados...
Gibbs	Desarrollos matemáticos, enunciados...
En menor medida se cita a Carathéodory, en su desarrollo matemático y sus enunciados.	

<sup>41</sup> Para evitar repetición de la información presentada por otros autores, algunos textos no se incluyen en los Cuadros, pero se mencionan a lo largo de la exposición cuando corresponde hacerlo.

A su vez, Boltzmann es el autor citado predominantemente en los textos con enfoque estadístico como los de Reif (1964) y Díaz Peña (1979) y también en los textos de física general [Resnick (1964,2002, Feynman (1964), Alvarenga (1976), Hewitt (1995)] y los que presentan enfoque mixto como el de Callen (1985).

Centrada nuestra atención hacia los libros de termodinámica, se puede constatar que en todos los textos revisados **ninguno** sigue a Clausius más allá del desarrollo que lo condujo a la definición de la entropía y que Fermi reproduce en su obra (Figura 2.9). Ni Planck, Gibbs ni Carathéodory como fundadores retoman o mencionan siquiera los componentes Y y Z de la entropía de Clausius. No mencionan tampoco su concepción de las diferentes clases de transformación, ni su analogía de éstas con los cambios de energía de la primera ley. Ante este hecho no queda sino concluir, que algunos de los elementos de la concepción de la entropía con la formulación original de Clausius, desaparecen.

Cabe enfatizar que esta desaparición no se da por desconocimiento de esas componentes, al menos no por parte de Planck sino por una **omisión deliberada**. Esta omisión voluntaria podría ser explicada de acuerdo a nuestro marco, con una mirada negativa, cargada de teoría descalificatoria que “no ve” lo que no quiere ver o que si se ve, se “ve como” un sin sentido por lo que “viéndolo” se le ignora. Pero, ¿Por qué ese desconocimiento y esa omisión deliberada? Abundemos.

Con los términos Y y Z, Clausius construye una expresión matemática para la entropía que toma en cuenta las tres especies de transformaciones que introduce en su desarrollo para la entropía basado en el principio de equivalencia de las transformaciones (Anexo 1.1). El *valor de transformación del calor H existente en el cuerpo* es  $Y = \int dH/T$  contado a partir de un estado inicial y depende de la temperatura, mientras que  $Z = \int dz$  es la disgregación y depende del arreglo de las partículas. Z es el *valor de transformación del arreglo de las partículas del cuerpo*, Clausius concluye que **“de la suma de estas cantidades se obtendrá lo que he designado por S (...) que es la entropía o contenido de transformación de los cuerpos”** (Clausius, Memoria IX, pp. 408-412)

La introducción de los términos Y y Z provocaron fuertes comentarios críticos por parte de Maxwell y Tait, pues Maxwell afirmaba que su introducción, “solo confundía la estructura conceptual de la termodinámica al incorporar con ellos elementos e hipótesis acerca de la constitución molecular de los cuerpos” (Harman, 1962, pp. 64-66).

Efectivamente, la controversia entre Maxwell y Clausius se origina por la tajante separación que a partir de Maxwell se dio entre los enfoques macroscópicos y microscópicos, ignorándose desde entonces el segundo miembro de la igualdad propuesta por Clausius:

$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$ , bajo el argumento (maxwelliano) de que con los términos que la constituirían se introducían “modelos moleculares inapropiados” en contra del propósito y definición para la termodinámica que se asume en esa época y que permanece hasta la fecha, como: “la investigación de las propiedades dinámicas y térmicas de los cuerpos, deducidas enteramente de las llamadas primera y segunda leyes de la termodinámica, sin ninguna hipótesis acerca de la constitución molecular de los cuerpos” (Harman, 1962, p.66).

Al respecto, puede aclararse que si bien Clausius tenía muy claro que tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica eran axiomas independientes de cualquier teoría corpuscular de la materia (Figura 2.4) efectivamente, tanto en su concepto de disgregación Z (relacionado con el arreglo de las partículas o con la configuración molecular del cuerpo), como en Y (relacionado con H el calor presente en el cuerpo y con la energía cinética de sus partículas), Clausius revela su creencia de que las leyes de la termodinámica podrían ser explicadas por una teoría de configuración molecular. Maxwell por su parte argüía que la segunda ley era una ley esencialmente estadística que describía macroscópicamente el comportamiento de un inmenso número de partículas (Harman, p.66), puede verse ahora que los dos tenían razón y ambos argumentos fueron aprovechados posteriormente por Boltzmann para construir su propia teoría.

De esta manera la relación  $\int dQ/T = Y+Z$  constituyó con Clausius el primer intento de unir el mundo macroscópico con el microscópico, adelantándose con ello a los planteamientos de Boltzmann.

La importancia de esta relación ha sido poco o nada apreciada y no vuelve a aparecer como tal, ni en el científico, ni en el ámbito educativo con los difusores. De hecho, se encuentra más bien mencionada en el campo de los filósofos, pero en los siguientes términos. Al respecto, Moulines (1990) p. 12 apunta:

“... las nociones realmente importantes para Clausius en este contexto, como surge en la parte final de su trabajo de 1865 [Memoria IX para nosotros] prueban ser dos funciones que él simboliza por Y y Z. “Y” representa lo que llama “el valor transformacional del contenido del calor” y Z denota otra magnitud Clausiana idiosincrásica, llamada “disgregación” del sistema. El valor transformacional Y se supone que es mensurable en términos de la energía cinética H de las moléculas del cuerpo y la temperatura del sistema completo, como está dado por la integral:  $Y = \int dH/T$

Clausius da entonces una definición puramente nominal de su entropía S simplemente como una abreviación de la suma  $Y + Z$ , esto es:  $S =: \int dH/T + Z = Y + Z$

Conceptualmente hablando, esto no parece tener mucho que hacer con la entropía como la noción básica que aprendemos hoy día de los libros de texto sobre la termodinámica clásica”...:

Por su lado Uffink (2001) señala:

... Clausius presenta lo que refiere como una forma ampliada de la segunda ley. Aquí, él estudia procesos donde el estado final difiere del estado inicial (...). Para ese propósito Clausius necesita un número de suposiciones acerca del posible cambio de los estados de ese sistema, y por tanto acerca de su constitución interna. Él caracteriza el estado del sistema introduciendo dos abstrusas cantidades: el “vorhandene wärme” H y la designación Z. La definición de estas cantidades no es muy clara (Clausius tan sólo marca, acerca de la disgregación, que Z representa “un grado de distribución”, que está relacionado al ordenamiento de las moléculas)

Por razones diferentes, ni Moulines ni Uffink conceden importancia a la “expresión ampliada” para la entropía de Clausius. El primero la toma como apoyo a su argumentación de que es con Gibbs con quien se inaugura la termodinámica, toda vez que con Clausius [la entropía] “no juega el papel fundamental [que debe jugar] en su teoría”. Uffink por su lado, la presenta “de pasada” como complemento histórico pero sin rol alguno en su estudio que es la relación de la entropía con la flecha del tiempo.

Lo destacable de las citas anteriores es que **existan**, que tanto Moulines como Uffink “vean” a Y y Z “como” parte del trabajo de Clausius.

Para la comunidad científica en cambio, el intento de Clausius de hacer inteligible su concepto de entropía pasó desapercibido. Esto es, no fue *visto como* o *como que*, por tanto **no fue significado**. Las críticas de Maxwell fueron juicio, condena y extinción. Así, la expresión ampliada para la entropía dejó de formar parte de la trama disciplinaria aceptada para la termodinámica. La “abstrucidad de los términos” de la que se queja Uffink y “lo poco que aporta a la concepción de la entropía como se aprende hoy día en los libros de texto de termodinámica clásica” que señala Moulines, no son sino consecuencias de esa mirada perdida. Las repercusiones que lo anterior pudiera tener en el campo educativo será discutidas más adelante.

### 3.3 La Evolución del Concepto de Entropía

Se ha concluido que la concepción original de Clausius para la entropía, ligada a los términos Y y Z, que llamaremos siguiendo a Uffink la expresión ampliada, no aparece ni es mencionada en los trabajos de los continuadores ni en los libros de texto de los difusores que constituyen nuestra muestra. Pese a ello, otras expresiones de esa misma época para el concepto de entropía están perfectamente vigentes, así que, si bien se dio efectivamente la pérdida del segundo miembro de la expresión ampliada, ésta fue notada por muy pocos. ¿En qué devino entonces la caracterización de la entropía después de Clausius?

La controversia surgida entre Maxwell, Tait y Clausius, se centró fundamentalmente en los términos Y y Z constituyentes del segundo miembro de la ecuación:  $\int dQ/T = Y + Z$ . El primer miembro nunca fue objeto de críticas y su deducción dentro del mundo macroscópico a partir de los ciclos de Carnot, fue indiscutible y aceptada por todos. La deducción de esa relación (Anexo 1.1) es la que siguen y se repite con pocas diferencias en todos los libros de termodinámica clásica revisados.

Sin embargo, en la presentación del concepto de entropía en los textos, se notan algunas diferencias, (Figuras 3.2 a y b), a saber: en el lenguaje con el que expresan y revelan su concepción de la entropía, como ejemplo: Pippard (1981), Piña Garza (1972) y Chue (1977) la

consideran una propiedad del sistema ligada a las restricciones impuestas. García Colín (1972) la define como  $S(A) \equiv \int_0^A dQ \text{ rev}/T$  y la considera un criterio para decidir si un proceso dado entre dichos estados puede ocurrir o no y bajo que condiciones. Abbott y Vanness (1989) por su parte afirman que no hay una definición explícita de la entropía por lo que, señalan, se considera un concepto primitivo.

En congruencia con el enfoque postulador (Figura 3.6), los textos de termodinámica, con mayor o menor refinamiento matemático, reproducen los tratamientos clásicos de Carnot, Clausius, Planck, Gibbs y Carathéodory y no “*ven como*” necesidad el dar una explicación más detallada de un concepto que, señalan, “se desprende de la segunda ley (la que es tomada como un axioma), y desde la cual se va a poder definir una variable termodinámica, la entropía,.. “García Colín (1972) Figura 3.2a. Por su lado, Chue (1977) afirma, “es posible probar formalmente su existencia [se refiere a la entropía] como propiedad desprendida de la segunda ley, con el Teorema Hatsopoulos-Keenan” (Figura 3.2b). De esta manera, para los libros de Termodinámica revisados, el sentido disciplinario para la entropía se agota en la definición matemática y no existe más sentido que el que obtiene por ser una:

- propiedad derivada de la segunda ley
- variable termodinámica
- función de estado
- propiedad intrínseca de un sistema
- criterio para decidir si un proceso dado entre dos estados puede ocurrir o no
- criterio para distinguir las transformaciones irreversibles de las reversibles
- criterio para definir la dirección en la cual un proceso puede tener lugar
- un postulado

Lo anterior se confirma en otras obras de aproximación clásica como la de Zemansky (1968) o Stuekelberg (1974). Así pues, como una conclusión preliminar en este punto, se está de acuerdo con Badger (1967) cuando afirma que la entropía se introduce como **una necesidad del modelo analítico-matemático utilizado**, su aparición en el modelo matemático está justificada, pero no puede ser conectada a ningún fenómeno, experiencia u observación física. (Badger 1967, p. 234).

Quizá por ello, dice Fast (1970), “para la mayoría de las personas, sin o con poco entrenamiento en termodinámica, el concepto de la entropía que es de por sí sumamente abstracto, (aún presentado bajo el desarrollo histórico que se inicia con Carnot y Clausius y sigue la secuencia: Carnot-Kelvin-Clausius-Planck-Gibbs) se vuelve completamente incomprensible cuando se introduce mediante el método de Carathéodory”. De allí que sea imprescindible el que se atienda la inteligibilidad del concepto por los difusores.

### 3.3.1 En Busca de la Inteligibilidad de la Entropía

Sin “*ver como*” necesidad el construir un significado físico para la entropía, los difusores con enfoque clásico-postulatorio se acomodan bien en el logicismo, sin más compromiso para la inteligibilidad del concepto que el que se desprenda de la congruencia matemática con los referentes fenomenológicos de Carnot y del seguimiento de una disciplina en perfecta autocontención paradigmática.

Esta facilidad logicista para la presentación del contenido de la termodinámica con enfoque postulatorio, no existe para los difusores de textos más abarcativos como los de física general o los de fisicoquímica, que se enfrentan a la tarea de hacer una presentación comprensible de la entropía. No obstante, estos autores tienen a su favor el no estar atados al paradigma de la termodinámica clásica y tienen la libertad de buscar, sea en el enfoque macroscópico, sea en el microscópico, aquellos desarrollos que consideren más apropiados para apoyar la presentación y mejorar la comprensión de la entropía.

En este sentido acuden a lo que Fast (1970) llama las dos raíces de la entropía:

“Por un lado, en la termodinámica clásica la entropía se define de una manera abstracta como una variable termodinámica del sistema bajo consideración; por otro lado, en la mecánica estadística, se la define como una medida del número de maneras en las cuales las partículas elementales del sistema pueden ser arregladas bajo las circunstancias dadas...” Fast (1970 p. 1).

Los libros revisados de Física General de nivel propedéutico y universitario, (Figura 3.4) efectivamente presentan ambos enfoques y en todos ellos aparece la entropía como

*desorden*, concepción que se había estado rastreando, y que comparten tanto los libros de fisicoquímica (Figura 3.5), como los de enfoque microscópico (Figura 3.2<sup>a</sup>). Ninguno sin embargo, hace alusión al desorden molar o molecular de Boltzmann, mas bien presentan el concepto a partir de consideraciones probabilísticas [Resnick (1966-2002) y cuánticas (Reif (1964) y Díaz Peña (1979))].

Al respecto, citaremos con cierta extensión a Díaz Peña (1979) y a Callen (1985) porque consideramos que sus desarrollos y argumentos, son representativos de los textos con enfoque estadístico y mixto, y es posible, de su comparación, destacar diferencias.

### 3.3.1.1 Díaz Peña, M. (1979 pp. 54-58)

“...matemáticamente, el desorden está relacionado con la probabilidad o con el número de maneras de colocar una serie de objetos. Cuanto mayor es este número, mayor es la probabilidad de que estos objetos estén ordenados al azar, que es lo mismo que decir que están desordenados. Consideramos para ello el caso de barajar una baraja. Si las cartas se encuentran originalmente en su correcto orden (que correspondería al estado de entropía nula) y comenzamos a barajar (que correspondería a la agitación térmica debida al aumento de temperatura), entonces estamos inciertos de las cartas (que correspondería a una ganancia de entropía). Una medida de nuestra incertidumbre o del estado de desorden de la baraja viene dada por el número o de maneras posibles de colocar las cartas, todas igualmente probables *a priori*. Designemos este número por  $W$ . Consideremos ahora dos barajas, que barajamos independientemente. El número de maneras de colocar las cartas,  $W$ , todas igualmente probables, es el producto de cada uno de los números de maneras de colocar las cartas de cada baraja separadamente,  $W_1$  y  $W_2$ , ya que una colocación de las cartas en una baraja puede ocurrir con independencia de cualquiera de las posibles posiciones de las cartas en la otra baraja, es decir,  $W = W_1 W_2$

Por otra parte, termodinámicamente, la entropía,  $S$  de un sistema que consta de dos partes independientes, es la suma de las entropías  $S_1$  y  $S_2$  de cada una de las partes separadamente, es decir,  $S = S_1 + S_2$ . Por tanto, hemos de relacionar:

- i. la propiedad creciente de  $W$  con la creciente de  $S$
- ii. la propiedad multiplicativa de  $W$  con la aditiva de  $S$

Esto nos sugiere una relación de la forma  $S = k \ln W$  (donde  $k$  es la constante de Boltzmann)

como la única posible, ya que

$$S = k \ln W = k \ln (W_1 W_2)$$

$$S = k \ln W_1 + k \ln W_2$$

$$S = S_1 + S_2$$

Léase ahora como presenta Callen el mismo tema, destacando los puntos de nuestro interés.

### 3.3.1.2 Callen, H. (1985 pp. 329-332)

Para este autor, la termodinámica constituye un formalismo de gran generalidad erigido sobre las bases de unas pocas hipótesis simples o postulados. El concepto central, que es introducido a través de estas hipótesis simples, es la entropía que entra en la formulación de manera abstracta como la función variacional en un principio matemático extremo, alude a Gibbs pero no lo explicita, que determina los estados de equilibrio.

Al respecto, Callen señala:

La entropía es uno de los parámetros extensivos como la energía, el volumen, el número de moles y el momento magnético. Su significado físico se obtiene a través de la mecánica estadística.

Sea un sistema cerrado de un volumen dado  $V$  y un número dado de partículas  $N$ . Los parámetros  $U$ ,  $V$  y  $N$  son las únicas restricciones del sistema. La mecánica cuántica dice que si el sistema es macroscópico, deben existir muchos estados cuánticos discretos consistentes con los valores especificados de  $U$ ,  $V$  y  $N$ . El sistema puede estar en cualquiera de estos estados permisibles.

El estado cuántico en el que se encuentre el sistema no permanece sin cambio y para siempre pues el aislamiento perfecto no existe. Hay fuerzas débiles, gravitacionales, electromagnética que permean todo espacio físico y que interaccionan con el sistema. El vacío ahora se entiende como una entidad compleja y fluctuante. Los estados cuánticos de los átomos no permanecen fijos para siempre precisamente porque interaccionan con los modos azarosos del vacío.

Un punto realista de un sistema macroscópico es aquel en el que el sistema hace transiciones entre estados cuánticos al azar y de manera extremadamente rápida.

Una medida macroscópica tiene sentido solo como un promedio de las propiedades de miríadas de estados cuánticos.

Todos los estudiosos del área están de acuerdo con lo anterior. Por otro lado, como las transiciones son inducidas por procesos puramente al azar es razonable suponer que en un sistema macroscópico cada estado cuántico permisible, consistente con las restricciones externas, se muestra con igual probabilidad.

La suposición de que cada estado cuántico tiene la misma probabilidad, constituye el postulado fundamental de la mecánica estadística. Entonces, si las restricciones externas se remueven, se esperará que aumente “el número de estados permisibles” de hecho “el número de microestados entre los cuales el sistema sufre transiciones y los cuales comparten la misma probabilidad de ocupación, aumenta al máximo permitido por las restricciones impuestas”. Comparando esto con el postulado de la entropía (“la entropía aumenta al máximo permitido por las restricciones impuestas”)

se sugiere que la entropía puede ser identificada con el número de microestados consistentes con las restricciones macroscópicas impuestas.

Sin embargo, al igual que con (Díaz Peña), Callen apunta que con este razonamiento surge la dificultad de que la entropía es aditiva (extensiva), mientras que el número de microestados es multiplicativa esto es, el número de estados disponibles para dos sistemas es el producto de los números disponibles para cada uno. Para interpretar la entropía, entonces se requiere una cantidad aditiva que mida el número de microestados disponibles para un sistema. La única respuesta, es identificar la entropía con el logaritmo del número de microestados posibles (el logaritmo de un producto es la suma de los logaritmos). Así,  $S = k_B \ln \Omega$ ; donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann, y  $\Omega$  es el número de microestados consistente con las restricciones macroscópicas. Esta definición para la entropía establece la base de la mecánica estadística. Callen se ocupa también en su obra, de dar una interpretación de la entropía asociada con el desorden, para ello, se basa en el marco conceptual de la Teoría de la información erigida por Claude Shannon (1949, p. 380) que fue publicada al final de los años cuarenta.

### 3.3.1.3 Shannon, C. (1949, citado por Callen 1985 en pp. 389-382)

Para esclarecer la interpretación se hace uso de la analogía siguiente:

Supóngase que a un niño de pocos años se le dice que elija un cuarto de una casa de  $j$  cuartos y que se espere quieto allí hasta que sus padres regresen por él. Esta es la regla que define el orden dice Callen, es de esperarse, continuando con la analogía, que el niño no se quede en ningún cuarto sino que vague por toda la casa quedándose una fracción de tiempo  $f_j$  en el cuarto  $j$ . Shannon se planteó el problema de definir una cantidad que midiera el desorden asociado con una distribución  $\{f_j\}$  dada, para lo cual establece los requerimientos siguientes:

- a) La medida del desorden será definida enteramente en términos del conjunto de número  $\{f_j\}$ .
- b) Si cualquiera de las  $f_j$  es la unidad (y todas las demás son cero) el sistema está completamente ordenado, esto es, la cantidad que mida el desorden será cero.
- c) El desorden máximo se alcanzará cuando cada  $f_j$  sea igual a  $1/\Omega$  (esto es cuando el niño no muestre preferencia por ninguno de los cuartos y vague por ellos de manera totalmente al azar).  $\Omega$  es el número de cuartos.
- d) El máximo desorden sería una función creciente de  $\Omega$  (si el número de cuartos por los que el niño puede vagar se incrementa).

- e) El desorden se compondría aditivamente de desórdenes parciales. Esto es: sea  $f^{(1)}$  la fracción de tiempo que el niño pasa en el primer piso y sea  $D^{(1)}$  el desorden de esta distribución en el primer piso, entonces  $f^{(1)} D^{(1)}$  será el desorden de esta distribución en el primer piso, y similarmente  $f^{(2)}, D^{(2)}$  será el desorden para el segundo piso, entonces  $f^{(j)} D^{(j)}$  será el desorden total. Así:

$$f^{(j)} D^{(j)} = \text{Desorden total} = f^{(1)} D^{(1)} + f^{(2)} D^{(2)}$$

Estos atributos cualitativamente razonables, señala Callen, determinan unívocamente<sup>42</sup> la medida del desorden

$$\text{Desorden} = K \sum f_j \ln f_j ; \quad K \text{ constante positiva arbitraria}$$

Por otro lado -regresando a conceptos de la termodinámica- se sabe que para un sistema aislado

$$f_j = 1/\Omega \quad \text{y} \quad S = k \ln \Omega$$

y para un sistema en contacto diatérmico, la fracción de tiempo que ocupa el estado  $j$  es

$$f_j = e^{-\beta E_j} / Z \quad \text{y} \quad S = k \beta \sum f_j E_j + k \ln Z$$

donde  $Z = \sum e^{-\beta E_j}$  por lo que basta comparar la expresión del desorden con las respectivas de la entropía, hacer  $K = K_B$  y sustituir para cada caso  $f_j$  para observar que la medida cualitativa de Shannon se corresponde con la entropía. Entonces se concluye que la interpretación física de la entropía es que “para un sistema cerrado la entropía corresponde a la medida cuantitativa para el máximo desorden posible en la distribución de un sistema sobre sus microestados permisibles”.

En las citas anteriores observamos que, de manera más simplificada, se repite en ambas el desarrollo seguido por Boltzmann y en los dos desarrollos se equipara el término  $K \ln \Omega$  (o  $k \ln \Omega$  si  $K = K_B = k$  constante de Boltzmann) con la entropía apoyándose, como señala Bent (1965), en “el buen acuerdo entre las predicciones teóricas de ese término con las observaciones experimentales y la lista de prominentes propiedades que comparte la cantidad  $k \ln \Omega$  con las propiedades que tiene la entropía”. Mencionamos abreviadamente, como ejemplos, algunas concordancias que subraya Bent (1965, p.138) entre la entropía clausiana y el término  $k \ln \Omega$

1. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  es una medida del desorden microscópico. Entre mayor es nuestra ignorancia en relación al estado microscópico preciso de un sistema macroscópico más grande es  $\Omega$  y más grande  $S$ .
2. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  es una propiedad extensiva
3. Como  $S_{\text{total}}$ ,  $k \ln \Omega_{\text{total}}$  siempre aumenta en un proceso espontáneo
4. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  se anula para cristales perfectos, a  $0^0\text{K}$
5. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  nunca es negativa

<sup>42</sup> Callen remite a la prueba realizada por Kinchin, A. I. (1957).

6. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  aumenta cuando  $E$  aumenta
7. Como  $S$ ,  $k \ln \Omega$  tiene dimensiones de energía por grado.

Bent (1965 pp. 138, 139) recoge algunas de las propiedades comunes entre  $S$  y  $k \ln \Omega$ , que Boltzmann menciona en sus desarrollos relacionados con el significado matemático y físico de  $H$ , y que sin duda nos convencen del éxito de Boltzmann en probar “que los hechos en que se basa la segunda ley y las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas de un gas tienen más que un parecido superficial” Boltzmann (1964, p. 28). No obstante, consideramos necesario detenernos en la revisión de los puntos siguientes:

1. La validez del desorden como definición del concepto de la entropía.
2. La pertinencia de la inclusión de la teoría de información para esclarecer el concepto de entropía.

Para ambos puntos puede decirse en términos generales que resulta singular el que se defina o se busque aclarar un concepto fuera del campo donde fue creado. Al respecto, se plantean algunas consideraciones relacionadas a los puntos enunciados y se responderá más puntualmente al final del capítulo.

Centrados en el primer punto, comparemos el “desorden” al que se refiere Boltzmann con el que se alude en las obras revisadas. Se ha dicho ya (Capítulo 2) que Boltzmann (1964, pp. 40, 41) entiende por desorden molar y molecular aquel que es obtenido por negación del orden (ordered) molar y molecular. El orden molar lo define y es obtenido cuando en un gas:

“la velocidad media de una molécula puede ser más grande en una mitad del contenedor que en la otra o, más generalmente, cuando alguna parte finita del gas tiene diferentes propiedades que otra” mientras que “una distribución que exhiba regularidades definidas en grupos de dos o en un número pequeño de moléculas será llamada molecularmente ordenada (molecular-ordered)”, enseguida, Boltzmann apunta que, cuando estos agrupamientos especiales no están limitados a lugares particulares en el contenedor, sino más bien se encuentran en promedio igualmente distribuidos a través de todo el contenedor entonces la distribución se llamaría “molar disordered”. Pero señala, “si la trayectoria libre media es grande comparada con la distancia media de dos moléculas vecinas, entonces en un corto tiempo, moléculas completamente diferentes a las anteriores serán vecinas cercanas una a la otra. Una distribución molecularmente ordenada (molecular-ordered) pero molarmente desordenada (molar-disordered) será con alta probabilidad, transformada en poco tiempo en una distribución molecularmente desordenada (molecular-disordered) (...) por lo que “uno

puede considerar las colisiones entre moléculas, en el lugar donde otra colisión ocurrió, como eventos completamente independientes para cálculos estadísticos”.

Efectivamente, el concepto de desorden aparece con Boltzmann como una necesidad para utilizar el modelo estadístico. La suposición de que el estado está en desorden molecular y que todos los estados son igualmente posibles en una condición imprescindible para el cálculo de la probabilidad. De hecho Boltzmann dice: (p. 42) “explícitamente, hacemos la suposición de que el movimiento es molar y molecularmente desordenado (molar – and molecular-disordered)” y se reitera que bajo esta suposición realiza los cálculos de probabilidad.

Como se menciona en el Capítulo 2, Boltzmann no expresa de manera directa que la entropía es la medida del desorden, lo que señala es que (p. 74):

“El hecho que en la naturaleza la entropía tienda a un máximo muestra que para todas las interacciones (difusión, conducción de calor, etc.) las moléculas individuales de los gases reales actúan en sus interacciones, de acuerdo a las leyes de probabilidad, siempre que el gas, como el gas que tenemos en mente, actúe como un gas molecularmente desordenado (molecular-disordered)”,... y añade (p.75), se encuentra entonces que la segunda ley es una ley probabilística (...) y más aún, la prueba de que para un gas de volumen arbitrario  $\Omega$ , la cantidad  $\Omega H$  –y para varios gases la cantidad  $\Sigma \Omega H$ – puede solo disminuir a través de colisiones permite considerarla como una medida de la probabilidad de estados”.

Así,  $\Sigma \Omega H$  es “**una medida de la probabilidad**”, pero también se corresponde con la entropía como ya Boltzmann había demostrado. Esto es, (ver detalles de los cálculos en su obra), describiendo sintéticamente en palabras su desarrollo, se tiene que:

**Primero:** Boltzmann encuentra la cantidad que llama  $H$  a partir de consideraciones del modelo mecánico (validez de las leyes de la mecánica clásica). Trabaja en un espacio de velocidades y con la frecuencia de colisiones para determinar la distribución de las velocidades y demostrar que la distribución de Maxwell es la única posible en el estado de equilibrio. Para ello introduce las nociones de desorden molar y molecular y establece como supuesto básico el estado de desorden molecular en los gases en estudio.

**Segundo:** Explica el significado matemático de la cantidad que llama  $H$  a través del cálculo de probabilidades. Para ello, transforma el espacio continuo en un espacio discreto constituido de celdas distintas de volúmenes  $W$  iguales. Construye un estado cinético del gas al atribuir, para

un volumen del gas dado, a la celda n° 1,  $n_1$  puntos de velocidad; a la celda n° 2,  $n_2$  puntos de velocidad... etc., la presencia de puntos de velocidad de las moléculas en cada elemento de volumen lo considera un evento (estado) probable. Cada repartición de las moléculas que caracteriza un estado cinético, puede ser construido de manera análoga a los eventos de extracción de una urna de pelotas de diferentes colores, de acuerdo a las reglas del análisis combinatorio y probabilístico. Boltzmann encuentra que el logaritmo de la probabilidad del número de eventos (estados posibles) es la cantidad H.

**Tercero:** Presenta el significado físico de H a través de su comparación con la entropía para un gas, este significado es obtenido a partir de la suposición de que a un volumen  $\Omega$  de un gas se le introduce una cantidad de calor  $dQ$ . Bajo consideraciones mecánicas pero con su perspectiva microscópica molecular, Boltzmann llega a las siguientes expresiones para  $dQ$  y para la entropía respectivamente:

$$dQ = Rk/\mu [3(1+\beta) dT/2 + \rho T d \rho^{-1}]$$

$$\int dQ/T = (Rk/\mu) \ln [T^{3/2 (1+\beta)} \rho^{-1}] + \text{constante}$$

o para varios gases (cuando  $\beta$  tiene el mismo valor constante para todos)

$$\text{Entropía}_{\text{mecánica}} = R \sum (k/\mu) \ln [T^{3/2 (1+\beta)} \rho^{-1}]$$

Por otro lado, ahora en el terreno microscópico y bajo consideraciones de probabilidad se tiene que  $f = ae^{-hmc^2}$  que es la distribución de Maxwell, substituyendo en

$$H = \int f(\ln f)dw ,$$

e integrando, se encuentra que

$$H = n \ln (\rho T^{-3/2})$$

Donde  $-H$  representa (aparte de una constante) el logaritmo de la probabilidad del estado del gas considerado. Entonces el logaritmo de la probabilidad B del arreglo de las moléculas y distribución de estados en varios gases es:

$$\ln B = -\sum \Omega H = -\sum \Omega n \ln (\rho T^{-3/2})$$

multiplicando por  $RM$  que es constante para todos los gases ( $M$  es la masa de la molécula de hidrógeno), se encuentra que:

$$RM \ln B = -\sum RM \Omega n \ln [\rho T^{-3/2}] = R \sum (k/\mu) \ln (T^{3/2} \rho^{-1})$$

Expresión que coincide con la entropía mecánica anteriormente calculada. Con esto

Boltzmann concluye que la  $\sum \Omega H$ , puede **ser considerada una medida de la probabilidad de estados.**

Con lo señalado en los tres puntos anteriores, las citas de Díaz (1971) y Callen (1985), las Figuras 3.2 a 3.5 y los propios libros consultados, regresamos a preguntarnos acerca de “la validez del desorden como definición del concepto de la entropía”.

### 3.4 La Entropía como Desorden

Si bien es común que en los textos se refiera a la entropía como “medida del desorden” en la revisión de ellos encontramos que para fundamentar esa característica los autores explican el desorden sea: marcando diferencias entre orden y desorden mediante el uso de ejemplos, Resnick (1966, p. 640-641), Reif (1964, pp. 299-300); sea citando a otros autores o interpretando y reproduciendo a Boltzmann.

En la interpretación a Boltzmann, por lo general, se parte de la expresión que equipara la entropía con el logaritmo de la probabilidad, (dejando a un lado la constante), y señalan que “la entropía de un sistema es meramente una medida logarítmica del número de estados accesibles al sistema (...) y que la entropía proporciona una medida cuantitativa del grado de desorden del sistema” (Reif pp. 142-149). Esto es, el razonamiento es el siguiente, la probabilidad de que ocurra un arreglo de moléculas sin un orden determinado es mucho más alta que la probabilidad de que se de un estado ordenado, por el hecho de que existe un mayor número de estados sin orden que con él. Por otro lado, se sabe que la función logarítmica aumenta al crecer su argumento, por lo que a mayor número de estados en desorden, mayor probabilidad, mayor valor de la función logarítmica y mayor entropía.

Además están los autores que para fundamentar la definición de la entropía como medida del desorden, citan a otros. Bent (1965) y Hewitt (1995) por ejemplo, apelan a un criterio de autoridad sin mayores aclaraciones. Estos autores asumen la definición dada por Richard Feynman (1964), a saber, “si medimos el desorden por el número de maneras en que podemos disponer las cosas internamente de modo que parezca lo mismo desde el exterior, la entropía es el logaritmo de ese número de maneras (...) con la definición dada para el desorden, **la entropía mide el desorden.**” (p. 46-10) Figura 3.4 a.

Cabe resaltar que es en la obra de Feynman donde, desde 1964, se encuentra una definición para el desorden y la caracterización de la entropía como medida de mismo, frase que ha pasado a “*verse como*” y a constituirse como, la definición para la entropía. De hecho no es un desatino suponer que corresponde a Feynman el origen y acuñamiento de la popular frase. Como resumen, podemos afirmar que la frase “entropía como medida del desorden” reinterpreta la frase debida a Boltzmann “la entropía es el logaritmo del número de estados del sistema” o la frase, también de Boltzmann, de ser la entropía considerada como “una medida de la probabilidad de estados”.

### 3.4.1 La Entropía como Información

Otros autores buscan la inteligibilidad para la entropía a partir de diferentes enfoques, Callen (1985) y Resnick (1966) como ejemplo, citan a Shannon (1949).

La introducción de la Teoría de Comunicación de Shannon da otra “*significación a la mirada*” y permite que el aumento de la entropía se “*vea cómo*” una pérdida de información del conocimiento de la ubicación espacial de las moléculas, Resnick (1964, pp. 18, 641), Díaz Peña (1979, pp. 55-56). Este último más específicamente apunta, “cuando un líquido se evapora, es bien conocido que la entropía por mol de gas es considerablemente mayor que la del líquido. Por otra parte, es evidente que la evaporación ha destruido un cierto conocimiento que teníamos acerca de las posiciones de los elementos del sistema. Además cualquier expansión del gas aumenta nuestra ignorancia sobre las posiciones de las moléculas y produce simultáneamente un aumento de entropía. Desorden y azar son casi sinónimos con ignorancia e incertidumbre”.

Pero, ¿aclarar el concepto de entropía de Clausius la introducción de la teoría de información? Desde esta perspectiva no parece una introducción pertinente la Teoría de Comunicación de Shannon y sí parece necesario en suma, evitar caer en una espiral de definiciones para la entropía y de aclaraciones de otros conceptos que surgen de la nueva definición que se adopta o que se está asumiendo en campos que son ajenos a la termodinámica.

Continuando con la revisión de los autores de texto, Freeman (1954), afirma que “el calor” es energía desordenada” y que la energía ordenada –como aquella que posee una bola en movimiento o un átomo de Uranio 235- se convierte en energía desordenada o calor cuando la bala golpea el blanco o cuando el átomo se fisiona, lo que origina un aumento de la entropía. Por otro lado, Serway (1987, pp. 410-411) asevera que “cuando un sistema aislado experimenta un cambio, el desorden en el sistema aumenta. Es más puede decirse que los cambios que ocurren en un sistema aislado conducen a una degradación de la energía. La energía ordenada se convierte en energía desordenada”, o como Badger (1967) dice, “la cantidad de energía que un sistema puede transferir depende no sólo de la cantidad de energía que el sistema contiene sino también del nivel de la energía en el sistema (...) la degradación del nivel de alguna energía puede considerarse como la segunda ley de la termodinámica. La primera y segunda ley de la termodinámica pueden enunciarse de la siguiente manera: en cada transferencia de energía, la energía debe conservarse; pero el nivel de energía no puede ser conservado y alguna energía debe ser permanentemente reducida (degradada) a un nivel inferior”, (p. 218)

Con los autores citados, se han identificado dos interpretaciones más para la entropía:

- como medida de la pérdida de información y  
como medida de la energía degradada

Es de suponerse que con cada interpretación, los autores de libros de texto buscan contribuir a la inteligibilidad del concepto.

Hemos seguido la trayectoria de esta búsqueda de inteligibilidad desde Boltzmann hasta las obras actuales. Sin embargo, hemos constatado que los autores de libros de texto han respondido a esa necesidad, **saliéndose del campo de la termodinámica**, al decir de Badger (1967, p. 235):

“es claro que una explicación del significado de la entropía basada en el comportamiento estadístico medio de las partículas de un sistema es simplemente un intento de explicar la significación de la entropía en el modelo termodinámico en términos de un modelo estadístico (...) esto es, el significado y la parte que una propiedad juega en *un modelo está siendo explicada en términos de otro modelo*<sup>43</sup>.”

Badger entiende por “modelo termodinámico” el que corresponde al enfoque macroscópico, clásico y energético dentro del cual como ya se ha dicho, está la significación física para la entropía construida por Clausius. Dentro y fuera de ese modelo tal significación fue desconocida (a partir de Maxwell), por sus contemporáneos, ignorada por sus continuadores, perdida por sus difusores y olvidada por los estudios actuales. Con lo expuesto no cabe extrañarse de que la significación física de Clausius en el ámbito educativo sea completamente inexistente.

Lo que Badger (1967) argumenta es la improcedencia de explicar en un campo, lo que fue construido en otro, aunque Fast (1970) por su lado, afirma que “la perspectiva atómica puede ayudar a dar un significado más profundo a las leyes y conceptos de la termodinámica”. (p.2)

### **3.5 La Evolución de la Entropía ¿Qué y por qué cambió el Concepto de Entropía?**

La concepción de Clausius de la entropía se relaciona con la segunda ley de la termodinámica que tiene como antecedentes los trabajos de Carnot y los fenómenos y procesos relacionados con intercambios de calor (Figura 3.6).

La entropía es un concepto asociado con ciclos irreversibles, con una transformación no compensada, y con el valor de equivalencia  $Q/T$ . El principio de equivalencia de las transformaciones es la esencia de la entropía, para facilitar su comprensión Clausius introduce los términos  $Y$  y  $Z$  desde una visión que lo compromete con la teoría corpuscular de la materia. En Clausius, además, coexisten las miradas macroscópica y microscópica que se manifiestan en la expresión:

---

<sup>43</sup> El resaltamiento en cursivas está en el original.

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$$

La parte macroscópica  $\int dQ/T$ , permanece inalterada hasta nuestros días en todos los libros de termodinámica clásica consultados. Gibbs le da substancia y Carathéodory formalidad matemática. La parte microscópica se continúa con Boltzmann y se conecta con enfoques probabilísticos arribando a la expresión boltzmanniana para la entropía:

$$S = k \ln \Omega.$$

Por otro lado, desde planteamientos provenientes de la mecánica cuántica con Schrödinger, la entropía tiene como expresión:

$$S = U/T + \psi = U/T + k \log \sum_e e^{-E_e/kT}$$

Adicionalmente, desde la teoría de comunicación la entropía es interpretada como portadora de información relacionada con el conocimiento o la ignorancia acerca del sistema. Con Feynman aparece la frase “la entropía es la medida del desorden” que se generaliza como su definición.

La entropía ha sido interpretada y reinterpretada a lo largo del periodo que hemos estudiado porque han habido cambios disciplinarios que han modificado a los sujetos y la *significación de su mirada*. No hay una entropía, hay tantas entropías como disciplinas (miradas) de acercamiento existen: entropía termodinámica, entropía estadística, entropía cuántica, entropía informacional, etcétera. La Figura 3.7 muestra un resumen de los planteamientos de Clausius y Boltzmann como los constructores de origen para facilitar su comparación, y la Figura 3.8 muestra la evolución de la entropía.

CLAUSIUS	BOLTZMANN
<p><b>Pregunta:</b> ¿Qué cambios generan los fenómenos de intercambio de calor en un cuerpo?</p> <p><b>Respuesta:</b> Tres tipos o especies de transformaciones:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Transformaciones de calor en trabajo o de trabajo en calor.</li> <li>2. Transformaciones por intercambio de calor.</li> <li>3. Transformaciones debidas al cambio en el arreglo de las partículas (disgregación) que constituyen el cuerpo).</li> </ol> <p><b>Propósito:</b> Encontrar una expresión matemática con la cual expresar todas las transformaciones de un cuerpo.</p> $dQ/T = dH/T + dZ$ <p>(H es el contenido de calor del cuerpo y Z es la disgregación)</p> $dQ/T = Y + Z$ <p>(dos componentes para la entropía) donde:</p> <p>Y sólo depende de la temperatura y se interpreta como el valor de transformación del contenido de calor</p> <p>Z sólo depende del volumen y se interpreta como el valor de transformación del arreglo actual de las partículas.</p> <p>La suma de las dos cantidades precedentes es <b>la entropía o el contenido de transformación del cuerpo.</b></p> <p>La entropía en Clausius está ligada al valor de transformación que tiene un cuerpo, informa de su capacidad para sufrir transformaciones.</p> <p><b>Noción clave:</b> Transformabilidad</p>	<p><b>Propósito:</b> Construir una descripción más precisa de la naturaleza del movimiento de las partículas microscópicas de un cuerpo y probar que la analogía mecánica entre los hechos sobre los que se basa la Segunda Ley de la Termodinámica y las leyes estadísticas del movimiento de las moléculas de un gas es más que una semejanza superficial.</p> <p>La entropía con Boltzmann queda expresada finalmente como <b>el logaritmo natural del número de estados posibles</b> en los que puede estar el gas.</p> $S = k \ln \Omega$ <p>donde <math>\Omega</math> es el número de estados posibles y k es la constante que lleva su nombre.</p> <p>Boltzmann parte de la suposición de la constitución atómica de la materia y se plantea su estudio a partir de que los fenómenos mecánicos son irreversibles si el número de partículas es suficientemente grande.</p> <p>De diversas consideraciones de tipo estadístico y llega a la expresión: <math>k \ln \Omega</math> misma que equipara con la entropía obtenida a partir de la mecánica newtoniana porque presenta las mismas características que las de la entropía mecánica, como las de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– estar relacionada con el desorden</li> <li>– ser una propiedad extensiva</li> <li>– siempre aumentar en un proceso espontáneo</li> <li>– nunca ser negativa</li> <li>– ser nula para cristales perfectos a cero grados Kelvin</li> <li>– aumentar cuando la energía térmica de un cuerpo aumenta</li> <li>– tener las mismas unidades</li> </ul> <p><b>Nociones claves:</b> Probabilidad y Desorden</p>

**FIGURA 3.7 Resumen de los planteamientos originales de la entropía**

¿Qué era la entropía con Clausius? (1862-1865)	¿Qué se modificó? (1865-....)
<p>Un concepto asociado con ciclos irreversibles como una transformación no compensada macroscópica y matemáticamente relacionada con el valor de equivalencia <math>Q/T</math>.</p> <p>Microscópicamente es <i>vista</i> por Clausius <i>como</i> la suma del valor de transformación del calor existente en el cuerpo a partir de un estado inicial dado "Y," más el valor de transformación de la disgregación Z, lo que proporciona el contenido de transformación del cuerpo en consideración.</p> <p>Matemáticamente:</p> $S = Y + Z$ <p>O más generalmente:</p> $\int dQ/T = \Delta S = S - S_0$ <p>donde</p> $S = Y + Z$ $S_0 = Y_0 + Z_0$ <p>La explicación microscópica no fue tomada en cuenta después de Clausius y desapareció de la termodinámica.</p>	<p>Bajo la aceptación de la definición de Maxwell (1871) para la termodinámica, sólo es posible para los estudiosos del campo, continuadores y difusores, mirar a la entropía como relacionada con variables macroscópicas. Esto es, con el término <math>Q/T</math>.</p> <p>El enfoque microscópico y sus términos desaparecen de la expresión original de Clausius mientras que el término macroscópico no sufre modificación alguna. Sólo adapta su expresión a los conocimientos nuevos.</p> <p>Después de Boltzmann (1892) se destaca por los difusores el significado matemático de H y la entropía es <i>vista como</i> el logaritmo de la probabilidad del número de estados accesibles al sistema</p> $S = k \ln \Omega$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Con Gibbs la entropía es <i>vista como</i> uno de los conceptos centrales de la termodinámica.</li> <li>- Schrödinger (1944) aplica su método general a la termodinámica a la que <i>ve como</i> campo de aplicación del mismo. Shannon (1949) desde la teoría de la información <i>ve a</i> la entropía <i>como</i> un concepto con carga informativa de conocimiento e ignorancia acerca del sistema.</li> <li>- Feynman (1964) introduce una definición para el desorden, dentro de un enfoque microscópico probabilístico y <i>ve a</i> la entropía <i>como</i> la medida de ese desorden.</li> </ul>

**FIGURA 3.8 La evolución de la entropía**

### 3.5.1 Consideraciones alrededor del Concepto de Entropía

Terminamos este capítulo con el planteamiento de algunas consideraciones con las que se explican los cambios sufridos por la entropía, desde nuestro marco teórico. Cada autor de las obras revisadas se ubica con relación a la termodinámica, en alguna de las siguientes tres posturas: macroscópica, microscópica y mixta. Clausius y Boltzmann son fundadores de las dos primeras y Feynman y Callen aparecen por el desarrollo de sus textos, como representantes del enfoque mixto en la muestra.

Clausius construye el significado físico para la entropía a partir de su trabajo sobre las **transformaciones** (de energía en un cuerpo). Su trabajo lo conecta con el razonamiento matemático desarrollado y con la expresión  $\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$  de la que solo persiste el primer miembro de la ecuación. De este hecho, y de la información acopiada es posible plantear las siguientes consideraciones

### Primera consideración

**El concepto de entropía de Clausius fue despojado de su significación física al “*verlo sólo cómo*” un concepto ligado a la expresión matemática  $\int dQ/T$ .**

**El significado actual para la entropía es consecuencia de enfatizar los aspectos matemáticos del concepto y de ignorar el esfuerzo de inteligibilidad que Clausius propuso.**

Clausius distinguía y separaba la Teoría General del calor con una *visión* macroscópica de la Teoría Especial del calor con una *visión* microscópica. Sin embargo, en aras de *facilitar la comprensión* “del principio de equivalencia de las transformaciones”<sup>44</sup> (que es la esencia de la entropía), *introduce los términos Y y Z* con los que asume su concordancia con la teoría corpuscular de la materia y con una interpretación del calor como movimiento de partículas. De esta manera, como atrás se dijo, con la expresión  $\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$  Clausius (p.409) propone por primera vez la unión del mundo macroscópico calorimétrico ( $\int dQ/T$ ), con el mundo microscópico abstracto e inasible.

Es esta propuesta de Clausius, inadmisibles para Maxwell<sup>45</sup>, la que inspira a Boltzmann, junto con los propios trabajos de Maxwell (quien con base en la teoría corpuscular de la materia, obtiene la distribución de las velocidades de las partículas). De hecho, cada uno es congruente con la teoría que portan y con la *significación* que con ella pueden construir. Abundando al respecto, Harman (1962, p.65) señala que:

Clausius argüía que las dos leyes de la termodinámica eran axiomas independientes de cualquier teoría acerca de la constitución de la materia, pero intentaba proporcionar una demostración de la inteligibilidad de la entropía formulando una teoría con nociones moleculares de base (...)(para ello) explica el significado físico de la entropía por el calor presente en el cuerpo (el cual es medido por la energía cinética molecular) y la disgregación (la cual proporciona una medida de la configuración molecular del cuerpo (...)) por su lado, Maxwell argüía que la segunda ley de la termodinámica era esencialmente una ley estadística que describía la conducta de un inmenso número de moléculas y que no podía ser explicada por una teoría de movimientos moleculares individuales (como proponía Clausius) por tanto buscó clasificar el estatus de la segunda ley en relación a su teoría estadística de los movimientos de las moléculas de un gas.<sup>46</sup>

<sup>44</sup>Clausius (1991, pp. 256-261): La suma algebraica de todas las transformaciones que se presentan en un ciclo cerrado sólo puede ser Positivas; en el límite puede ser nula.  $\int dQ/T \geq 0$

<sup>45</sup> Ya se ha mencionado el importante papel que jugó la controversia entre Maxwell y Clausius la que, repetimos, consistió fundamentalmente en el rechazo a la introducción de explicaciones microscópicas en un campo macroscópico.

<sup>46</sup> Boltzmann hace uso de estos dos modelos (modelo mecánico con Clausius y modelo estadístico de Maxwell) para construir una nueva rama de la física: la mecánica estadística.

## Segunda consideración.

**El sentido físico de la entropía de Clausius, descansa fundamentalmente en el principio relativo a los valores de equivalencia de las transformaciones. En las nociones Y y Z.**

Los términos Y y Z representan las transformaciones de la segunda y tercera clase o especie; esto es de transmisión de calor entre dos cuerpos a diferente temperatura y de cambio en la disgregación respectivamente. Las transformaciones de primera especie son las transformaciones de trabajo en calor y de calor en trabajo.

Su expresión matemática:  $\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$  (1), donde:

- 1ª especie  $\int dQ/T$  Transformaciones de calor en trabajo o de trabajo en calor.
- 2ª especie  $\int dH/T$  Transformaciones por transmisión de calor.
- 3ª especie  $\int dZ$  Transformaciones debidas al cambio en el arreglo de las partículas que constituyen el cuerpo.

El primer miembro de (1) recoge los aspectos macroscópicos de la entropía, depende de la determinación de las cantidades de calor<sup>47</sup> y de acuerdo a Clausius representa **la entropía total o el contenido de transformación del cuerpo.**

El segundo miembro de la ecuación (1) recoge los aspectos microscópicos de la entropía y de acuerdo a Clausius:  $Y = \int dH/T$  representa el valor de transformación del calor del cuerpo, a partir de un estado dado, y sólo depende de la temperatura y Z representa el valor de transformación del arreglo o configuración actual de las partículas de los cuerpos y sólo depende del volumen.

## Tercera Consideración

**La entropía como “medida del desorden” reduce su significación a una condición matemática relacionada con los cálculos probabilísticos.**

Boltzmann, en sus estudios con enfoque microscópico, construye la mecánica estadística y encuentra un término que llama H (diferente a la H de Clausius) con propiedades análogas a los de la entropía, a tal punto que le permite concluir que son los mismos.

<sup>47</sup> Fast (1970, p.4) la llama entropía calorimétrica.

A este término Boltzmann le asigna dos significados uno matemático y uno físico. El significado matemático proviene del análisis estadístico –combinatorio- probabilístico que utiliza para probar que la distribución de velocidad de Maxwell es la más probable de ser obtenida en el estado de equilibrio y es aquí donde introduce la condición y la necesidad de que el gas esté en desorden molecular. Esta es la interpretación, desde el sentido matemático la que ha prevalecido hasta nuestros días.

#### **Cuarta Consideración**

**La interpretación de la entropía como “medida del desorden” se ha construido fuera del campo de la termodinámica lo que ha dificultado la comprensión física del concepto.**

La igualdad de Boltzmann  $S = k \ln \Omega$  es la base que durante más de medio siglo ha sostenido la interpretación de la entropía como “medida del desorden”. Esta afirmación sin embargo, prueba que la significación más común para la entropía se ha tenido que encontrar “fuera” del campo de la termodinámica, sea dentro de la mecánica estadística, sea dentro de la teoría de la comunicación (información), sea dentro de la matemática. Lo anterior ha contribuido al obscurecimiento de la significación física de la entropía.

La salida de los difusores de la termodinámica clásica hacia otros ámbitos disciplinarios, ha propiciado la apertura de nuevas “miradas teóricas” que han enriquecido la lista de características que delimitan la entropía. No obstante, el abandono del campo ha propiciado que los difusores, sin una orientación clara de un significado físico de base para la entropía, releven o destaquen solo alguna de sus características atribuyéndole un carácter definitorio.

El relevamiento de tal o cual característica por los difusores, es consecuencia de la búsqueda de inteligibilidad para ese concepto y se preferirá destacar aquella que tenga el referente físico más inmediato e intuitivo. El desorden cumple con esa exigencia.

#### **Quinta Consideración.**

**La medida del desorden como definición de entropía parece facilitar su comprensión al apelar a la intuición, pero en realidad la reduce.**

Basar la definición de la entropía en un concepto como el desorden, de comprensión fácil e intuitiva es engañoso. Más aún si este concepto sólo recoge una parte de la definición

boltzmanniana o si éste es entendido a partir de la enunciación incompleta de Feynman (1964)<sup>48</sup> o si sólo se le considera con una dependencia funcional directa del volumen<sup>49</sup>.

La entropía, como se ha visto con Clausius consta de dos componentes “Y” –llamado por Brosseau y Viard, entropía cinética que toma en cuenta el movimiento de las partículas y depende de la temperatura –y “Z”\_ llamado por Clausius “disgregación” y por Brosseau y Viard entropía espacial que toma en cuenta el arreglo de las partículas y depende del volumen-, si el desorden se supone sólo dependiente del volumen, como lo consideran los jóvenes entrevistados por Brosseau y Viard, se deja incompleta la comprensión de la entropía al desconocerse o malinterpretarse la componente cinética de la entropía.

### **Sexta consideración.**

**El carácter polisémico de la entropía deviene de las distintas interpretaciones que diversas disciplinas le dan, cada disciplina constituye la expresión enunciativa y matematizada de la mirada de los científicos que la construyen; así pues, la polisemia de la entropía responde no a las disciplinas propiamente sino a los científicos (sujetos), quienes, con una *percepción significada* le otorgan sentido.**

La entropía ha pasado de ser una transformación no compensada y *vista como* el valor de transformación de los cuerpos por Clausius, a ser vista como la *medida del desorden* por algunos difusores.

Se ha señalado que la segunda interpretación proviene del significado matemático para la H de Boltzmann y que es el significado físico de Clausius ligado a las transformaciones el que se ha olvidado.

En suma, en la construcción de Clausius se encuentran dos planteamientos para la entropía: el que se ubica dentro de la termodinámica, (según la definición de Maxwell), y que conduce al término  $S = \int dQ/T$ , y el que se ubica en el campo microscópico más ligado con la búsqueda del sentido físico para la entropía que es *vista como* el contenido de transformación del cuerpo y que conduce a los términos Y y Z.

<sup>48</sup> El desorden es definido por Feynman como lo siguiente: “si medimos el desorden por el número de maneras en que podemos disponer las cosas internamente de modo que parezca lo mismo desde el exterior. La entropía es el logaritmo de ese número de maneras (...) con la definición dada para el desorden, la entropía mide el desorden.” (p. 46-10)

<sup>49</sup> A mayor volumen mayor desorden, es el razonamiento seguido por los estudiantes entrevistados por Brosseau y Viard.

La modificación que sufre el planteamiento original de Clausius ocurre en su propuesta microscópica. La macroscópica no ha sufrido cambio alguno. Tal modificación ha respondido al surgimiento de nuevas tramas disciplinarias (nuevos sentidos físicos, nuevas miradas disciplinarias con nueva carga teórica) que se han construido a lo largo del periodo estudiado. Efectivamente, la percepción significada de los continuadores y difusores ha impactado la elaboración de los libros de texto y el campo educativo.

Creemos haber dado respuesta a las preguntas de **Qué** y del **Porqué** del cambio en el concepto de Clausius para la entropía con base en la noción de *percepción significada* en los fundadores, continuadores y difusores autores de libros de texto.

Estamos ya en condiciones de investigar la vertiente educativa con la indagación de la *significación disciplinaria y perceptual* de la entropía en el campo de los profesores quienes se ubican también dentro de la categoría de los difusores-reconstructores-transmisores.

## **CAPÍTULO 4. DIFUSORES – PROFESORES. DEFINICIONES Y REPRESENTACIONES DE LA ENTROPÍA**

### **4.1 Vertiente Educativa**

Este capítulo explora la vertiente educativa a través de los difusores, pero enfocado ahora a los profesores en tanto reconstructores y transmisores del conocimiento acumulado en su disciplina. En este punto de la investigación, son los profesores quienes constituyen nuestro centro de interés al indagar y analizar la concepción que manejan para la entropía en el contexto del aula en cuanto a su *origen, definición, presentación, representación, desarrollo y evaluación*. El trabajo de campo se acerca a los profesores en correspondencia con una investigación empírica no experimental, que permite la indagación de fenómenos que se circunscriben al ámbito de un organismo, institución o persona y resulta significativa a partir de la relevancia del ente seleccionado y de la profundidad de la información obtenida, (Bonilla, 2003). De esta manera continuamos con la postura de corte cualitativo que hemos elegido seguir a lo largo de esta investigación. (Álvarez-Gayou, 2003).

Con el estudio de los reconstructores-transmisores, mantenemos continuidad con el seguimiento del concepto de entropía desde sus orígenes con Clausius hasta la época actual, a través de los continuadores, los difusores-autores de texto y ahora con los difusores-profesores.

#### **4.1.1 Trabajo de Campo**

El trabajo de campo con los profesores a través de la realización y análisis de una entrevista, tiene el propósito entre otros, de determinar si la concepción original de Clausius para la entropía, aparece en el contenido que se ofrece a los alumnos en el nivel superior, e identificar el modelo, de Clausius o de Boltzmann u otro, que predomine en el proceso de enseñanza a la que aluden en la entrevista y en la concepción que manejan con sus alumnos.

Esto es, como metas se busca:

1. Identificar las dificultades que los profesores perciben en los estudiantes con relación a la enseñanza, al aprendizaje y la evaluación del concepto de entropía.
2. Conocer la definición y/o representación de la entropía en los profesores de la muestra e identificar el Modelo de Clausius o Boltzmann u otro que predomine en su conceptualización de la entropía.
3. Identificar elementos de su práctica docente, a partir de la referencia que de ella se haga en la entrevista, e inferir la práctica dominante en su enseñanza.
4. Averiguar el papel que juega el aspecto histórico en el desarrollo de la termodinámica y en el desarrollo conceptual de la entropía que imparten los profesores entrevistados.
5. Determinar si la concepción original de Clausius para la entropía se reconoce y/o aparece en el contenido que se ofrece a los alumnos.
6. Inferir la postura epistemológica en los profesores a partir de la importancia que otorgan a los elementos que distinguen las tradiciones de la nueva filosofía y la de empirismo lógico.
7. Averiguar si, desde la experiencia de los profesores, sus alumnos, enfrentados al mismo problema de expansión de un gas que plantean en su estudio Brosseau-Viard, coincidirían o no con la respuesta dada por los alumnos franceses y el porque.

La Figura 1.2 del Capítulo I, nos recuerda que para el alumno, el conocimiento del profesor y el libro de texto constituyen para su aprendizaje, los elementos de influencia más directos y cercanos. En el capítulo precedente hemos explorado los textos. En este capítulo, complementamos la información y exploramos ahora el conocimiento que el profesor despliega en el aula con relación a la entropía, a partir de la suposición de que ese conocimiento tiene al menos dos componentes, el conocimiento de la disciplina que imparte (significación disciplinaria o conceptual) y el conocimiento que proviene de la experiencia (significación perceptual).

En la elaboración del guión de la entrevista partimos del supuesto de que a partir de la exploración del conocimiento disciplinario y experiencial, podrán alcanzarse las metas planteadas.

#### 4.1.2 Organización de la entrevista

Para el cumplimiento de las metas, la aproximación hacia los profesores de termodinámica es ineludible. La realización de entrevistas semi-estructuradas a una muestra de profesores del nivel superior y el análisis de sus respuestas, constituyen las fases del procedimiento a seguir. La primera fase requiere la construcción del instrumento, es decir la elaboración de las preguntas que se aplicarán en las entrevistas con los profesores y que constituirán la “Guía de Preguntas”. Para la segunda fase, se hará uso del marco de interpretación y análisis planteado en el Capítulo 1. Así, la organización del trabajo de campo, está en función de dar cuenta de los puntos siguientes: I) la construcción del instrumento en su contenido y justificación teórica; II) analizar los resultados a partir del marco de interpretación mencionado.

#### **4.2 Planeación del instrumento**

Para la exploración que nos interesa, es necesario elaborar un instrumento, (una guía de preguntas) para ser aplicado a los profesores tal que posibilite desprender, desde el análisis de las respuestas que proporcione el profesor, los aspectos predominantes con relación a la entropía y su enseñanza.

##### 4.2.1 Guía de la entrevista. Aspectos a considerar en su construcción

El acercamiento a los profesores introduce con mayor énfasis la dimensión de enseñanza. Esta dimensión debe ser incorporada tanto en la construcción del instrumento como en el marco de análisis. De hecho, es la enseñanza la que determina el contexto en el que cada pregunta de la Guía está ubicada.

Efectivamente, centrados en el concepto de entropía se desea obtener una respuesta directa por parte de los profesores a las siguientes preguntas (y otras derivadas) relacionadas con nuestro marco de interpretación, como se muestra enseguida:

- ¿Cómo comprenden los profesores la entropía? (Desde esta pregunta se posibilitará conocer la *significación disciplinaria y perceptual* en ellos, así como el *modelo de Clausius o Boltzmann* que predomina en su enseñanza).

- ¿Cómo la enseñan y evalúan? (Las respuestas permitirán conocer cómo hacen *inteligible* el concepto de entropía para sus alumnos y derivar de ello y de la evaluación del concepto, algunas de las características de su enseñanza).
- ¿Qué dificultades perciben en los estudiantes en la comprensión del concepto? (Con esta pregunta podremos conocer la *significación disciplinaria o conceptual* que para la entropía los profesores identifican en sus alumnos como obstáculos para la enseñanza y el aprendizaje del concepto).

De lo anterior, se configuran tres temáticas -no enunciadas en orden de importancia- y algunos supuestos que guiarán la selección de las preguntas del instrumento, a saber: 1. *dificultades generales para la enseñanza*; 2. *concepción de la entropía y sus fundamentos* en los profesores y 3. *la enseñanza* de la entropía en su presentación y evaluación.

Con respecto a la primera temática acerca de *las dificultades*, se apela a la experiencia del profesor para conocer los obstáculos generales que identifica en sus alumnos y que *percibe* como factores que influyen en la comprensión de la entropía.

La segunda temática, *la concepción de la entropía y sus fundamentos* en los profesores, así como su *representación*, se indagan a través de la interrogación directa a los profesores

En relación a la tercera temática: *la enseñanza*, es procedente aclarar que se está en conciencia de que la realización de preguntas que exploran la acción que realiza el profesor en cuanto a su enseñanza, conlleva de manera intrínseca la dificultad metodológica de que el investigador analiza lo que el profesor *dice* de la acción pero *no* la acción misma y que, en todo caso, lo que realiza el investigador es una “meta-interpretación”, esto es, la interpretación de la interpretación verbalizada del profesor respecto a su enseñanza.

No obstante, consideramos válidas las inferencias que se desprenden de este análisis de segundo orden, al partir del supuesto de que la experiencia del profesor, plasmada en años de reiteración del tema, le posibilita una recreación narrativa fidedigna de lo *que* imparte (la entropía) y del *cómo* la imparte (la presentación del concepto o su enseñanza).

#### 4.2.1.1 Dificultades para la enseñanza de la entropía

Lo mencionado para la enseñanza, se repite en lo que corresponde a la temática de las dificultades pues se espera obtener información del alumno por intermedio del profesor. Es decir, se estiman los antecedentes académicos del alumno en relación a su suficiencia para comprender el concepto de entropía y, las ideas previas que pudiera tener con relación a ese concepto, a partir de la *percepción* del profesor y no de manera directa a partir del alumno pero, de nueva cuenta, se apela a la larga experiencia de los profesores entrevistados para dar cuenta, de manera confiable, de lo que han podido identificar como obstáculos generales para la comprensión de la entropía, y en la identificación de los antecedentes e ideas previas que portan sus estudiantes al iniciar ese tema.

#### *4.2.1.2 Fundamentos de la entropía*

En la concepción de la entropía y sus fundamentos, las preguntas de la Guía se refieren precisamente a la entropía en cuanto a su definición e interpretación física por los profesores, de manera análoga al acopio de información que se recopiló de los autores de libros de texto. De las respuestas, se espera poder determinar en los profesores los orígenes de la entropía y el modelo que sustenten a partir de sus definiciones, sus conceptualizaciones y sus representaciones. Su ubicación se dará dentro del modelo de Clausius, dentro del de Boltzmann o dentro de un modelo mixto.

#### *4.2.1.3 Enseñanza de la Entropía*

Las preguntas relacionadas con la enseñanza de la entropía buscan determinar el enfoque que se asume al presentarla y el propósito que se plantean para justificar su enseñanza. El enfoque puede ser macroscópico, microscópico o axiomático y el propósito de enseñar entropía podrá deberse a su importancia intrínseca dentro de la disciplina, por necesidad de comprensión conceptual y/o para ser aplicada en la resolución de problemas prácticos.

Las temáticas para la elaboración del instrumento se presentan en la Figura 4.1. Las preguntas seleccionadas a partir de ellas constituyen el instrumento o “Guía” para la realización de las entrevistas que se presenta completo en el Anexo 4.1.

- A. Dificultades para la enseñanza de la entropía**
  - 1.0 Alumno**
  - 1.1 Antecedentes
  - 1.2 Ideas Previas
  - 2.0 Sin Problemas**
- B. Concepción de la Entropía y sus Fundamentos**
  - 1.0 La Entropía:**
  - 1.1 Definición
  - 1.2 Interpretación Física (Representación)
  - 2.0 Orígenes:**
  - 2.1 Clausius
  - 2.2 Boltzmann
- C. Enseñanza de la Entropía**
  - 1.0 Enfoque que asume en la presentación de la Entropía:**
  - 1.1 Enfoque macroscópico
  - 1.2 Enfoque microscópico
  - 1.3 Enfoque axiomático
  - 2.0 Criterios para evaluar la Entropía**
  - 2.1 Por la importancia del concepto para la Termodinámica
  - 2.2 Para la comprensión conceptual de la Termodinámica
  - 2.3 Para su aplicación en problemas prácticos.

**FIGURA 4.1 Temáticas consideradas para la construcción del instrumento**

### **4.3 Dimensiones de Análisis: Histórica. Epistemológica. Enseñanza.**

Para el análisis de las respuestas, como fue señalado en el Capítulo 1, proponemos atender las dimensiones histórica, epistemológica y de enseñanza. La primera se enlaza con el seguimiento diacrónico que hemos realizado para la entropía; la segunda, se vincula con las posturas filosóficas y la tercera se relaciona con la práctica docente, con la enseñanza.

#### 4.3.1 Categorías analíticas de cada dimensión

La entropía es un concepto científico cuya comprensión integral requiere, como se ha reiterado, del conocimiento de los dos principales enfoques que le dieron origen y fortalecieron su desarrollo: el de Clausius y el de Boltzmann. Aquí postulamos que la comprensión de la entropía en los profesores se manifiesta, parcialmente al menos, en el terreno de la conceptualización y que, esta conceptualización, deviene de la yuxtaposición de diferentes saberes explícitos e implícitos que consideramos pueden analizarse atendiendo a las tres dimensiones mencionadas.

### 4.3.1.1 Dimensión Histórica

Dentro de la dimensión histórica se proponen como categorías analíticas: la constitución de la materia; la herramienta matemática; la noción base de cada modelo; el enfoque que se asume y la pregunta que el modelo responde. La Figura 4.2 muestra la caracterización de cada modelo. La ubicación de las respuestas de los profesores en las diferentes casillas posibilitará determinar el modelo al que cada uno se adscribe.

<b>ELEMENTOS BÁSICOS</b> \ <b>MODELO</b>	<b>CLAUSIUS</b>	<b>BOLTZMANN</b>
Constitución de la Materia	Continua/discontinua	Discontinua
Herramienta matemática para el desarrollo del concepto de entropía.	Cálculo	Análisis combinatorio y probabilístico
Noción base	Transformación	Aleatoriedad / Desorden
Enfoque	Determinista macroscópico	Probabilístico microscópico
Pregunta	Explicar intercambios de calor	Descripción matemática del movimiento molecular. Explicar intercambios de calor desde la perspectiva atomística de la materia.

**FIGURA 4.2 Dimensión Histórica: Elementos para el análisis de las concepciones de entropía de los profesores**

### 4.3.1.2 Dimensión Epistemológica

Para la determinación de las categorías analíticas de la dimensión epistemológica, brevemente recordamos que la objetividad en la observación, es un valioso principio para el enfoque lógico empirista mientras que la subjetividad y el reconocimiento de la importancia del marco teórico como determinantes para la observación, es lo aceptado en el enfoque relativista.

La historia juega un papel menor, si juega alguno, en el enfoque lógico empirista, mientras que es fundamental en el enfoque relativista toda vez que se constituye en su herramienta de análisis. La verificación del conocimiento descansa en el primer enfoque, en la confrontación con la realidad mediante el experimento o en la inferencia lógica; en el segundo enfoque, la verificación se construye a partir de la coherencia y la consistencia interna. A su vez, el conocimiento es concebido en el enfoque lógico empirista, principalmente para el control de la naturaleza mientras que lo que enfatiza el relativismo, es la comprensión de la misma.

De esta manera, los elementos básicos seleccionados para la dimensión epistemológica son: la observación, la historia y su papel en ambos enfoques, la herramienta de análisis, la verificación y la finalidad del conocimiento. La Figura 4.3 concentra estos elementos.

ENFOQUE EPISTEMOLÓGICO ELEMENTOS BÁSICOS	LÓGICO - EMPIRISTA	RELATIVISTA
Papel de la observación	Objetiva (Neutra)	Subjetiva/Dependiente del Marco Teórico
Papel de la historia	Inexistente	Importante
Herramienta	Lógica formal	Estudios históricos
Verificación	Empírica o inferida	Coherencia y consistencia interna
Conocimiento	Control de la naturaleza	Comprensión de la naturaleza en términos de un marco teórico.

**FIGURA 4.3 Dimensión Epistemológica: Elementos para determinar la postura epistemológica de los profesores**

#### 4.3.1.3 Dimensión de Enseñanza

A su vez, la Figura 4.4 muestra los elementos que se tomarán en cuenta para el análisis de las respuestas de los profesores, atendiendo la dimensión de enseñanza o práctica docente. La adscripción de los profesores a una enseñanza tradicional o activa, será determinada a través de lo que refieran en relación a la presentación, desarrollo y evaluación del concepto de entropía.

Al respecto, se caracterizan los modos de enseñanza tradicional y la llamada enseñanza activa, mediante los elementos profesor, alumno, actividad del alumno, evaluación, contenido y modalidad de la clase, planteándose en cada caso lo que es distintivo de cada una. Interesa introducir esta dimensión y dentro de ella la distinción entre una enseñanza tradicional y una activa, para la determinación de una línea base con relación con la práctica docente actual, a partir de la cual sea posible asentar los elementos para la estructuración de una nueva propuesta de enseñanza para la entropía. La caracterización que se presenta en la Figura 4.4 es una adaptación de la que presentan Pozo y Gómez Crespo (2000, p.306).

ENSEÑANZA	TRADICIONAL	ACTIVA
<b>ELEMENTOS BÁSICOS</b>		
Profesor	Proporciona conocimientos verbales	Plantea conflictos, problemas y guía el proceso de su solución.
Alumno	Recibe los conocimientos y los reproduce.	Activa sus conocimientos previos y construye otros nuevos.
Actividad del Alumno	Controlada	Guiada
Evaluación	Centrada en la reproducción	Centrada en la comprensión
Contenido	Lógica de la disciplina como un conjunto de hechos y conceptos.	Lógica de la disciplina como resolución guiada de problemas.
Modalidad de la Clase	Expositiva centrada en el profesor.	Centrada en el alumno

Fuente: (Adaptación): Pozo, J. I. y M. A. Gómez Crespo (2000)

**FIGURA 4.4 Dimensión de Enseñanza: Para el análisis de la presentación del concepto de entropía**

En términos generales, siguiendo a Pozo y Gómez Crespo (2000), en la enseñanza tradicional el profesor proporciona conocimientos verbales de manera expositiva, la actividad del alumno es controlada por el profesor quien presenta el contenido siguiendo la lógica de la disciplina, concebida ésta como un conjunto de hechos y conceptos. El alumno es receptor pasivo de los conocimientos mismos que debe reproducir al ser evaluado.

Por su lado, los rasgos principales de la enseñanza activa se asientan: en el cambio del papel del profesor al considerarlo como guía en la actividad del alumno alrededor de la “solución” de conflictos y problemas; en que la actividad de la clase se concentra en el alumno quien activamente construye nuevos conocimientos; en la presentación de un contenido que sigue la lógica de la disciplina a través de la resolución guiada de problemas y en el que en la evaluación, se destaca la comprensión.

Importa señalar que la determinación de una práctica docente tradicional o activa permite la identificación del paradigma educacional al que se adscriben los profesores haciendo uso de la clasificación de Ernest (1993), como está considerado en nuestro marco teórico (Capítulo 1).

En la construcción de la guía de la entrevista, se atenderán las dimensiones enunciadas como se detalla a continuación.

## 4.4 La Entrevista

### 4.4.1 Guía de la entrevista

Como se ha dicho, el instrumento elaborado es una guía para la realización de entrevistas semi-estructuradas. Consta de 20 preguntas (aunque la pregunta 20 se incluye tan sólo para dar oportunidad al profesor de añadir observaciones, comentarios o precisiones), con las 19 preguntas restantes se busca el acopio de información que permita alcanzar las metas planteadas. Este instrumento es la versión final ajustada, después de aplicarse en pruebas piloto, a tres profesores en su primera versión y a seis profesores en su segunda versión. La Guía en su versión completa se presenta en el Anexo 4.1

### 4.4.2 La Muestra

La muestra de profesores fue seleccionada tomando en cuenta los siguientes criterios.

1. Con ubicación en el nivel superior (dado que la entropía es un tópico más bien de licenciatura o posgrado).
2. Con experiencia docente en el área (pues se acude a la experiencia para la detección de las dificultades y la descripción de su enseñanza).
3. Con grado mínimo de licenciatura.
4. Profesores en ejercicio en alguna de las dos Facultades elegidas (Facultad de Química y Facultad de Ciencias de la UNAM).

De 23 profesores de la Facultad de Química relacionados con la docencia de la termodinámica, 7 (30%) aceptaron ser entrevistados. De la Facultad de Ciencias 5 profesores fueron entrevistados, número cercano al 70% de los profesores titulares de Termodinámica. En total, la muestra consta de 12 profesores: 7 con grado de doctor, un candidato a doctor y 4 con grado de maestría. Sólo dos profesores tienen menos de 5 años de experiencia, el resto rebasa los 15 años. Todos los profesores se ubican en el nivel superior, (nivel de pregrado), pero un profesor es también de postgrado, (imparte termodinámica en maestría). En la Facultad de Química los alumnos atendidos por estos profesores, son de 2° y 3<sup>er</sup> Semestre de licenciatura y los alumnos de la Facultad de ciencias son del 6° semestre de la carrera de física. Ocho profesores son hombres y cuatro son mujeres. La Figura 4.5 resume las características de la muestra.

NUMERO DE PROFESOR	ÁREA DE FORMACIÓN	GRADO	EXPERIENCIA DOCENTE EN AÑOS	ASIGNATURAS	NIVEL DE EJERCICIO
1	Química	Doctor	3	Termodinámica relacionadas	Licenciatura y Maestría
2	Química	Maestría	4	Termodinámica relacionadas	Licenciatura
3	Química	Maestría	> 15	Termodinámica-relacionadas	Licenciatura
4	Química	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura
5	Química	Maestría	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura
6	Química	Estudios de Doctorado	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura
7	Ingeniería Química	Maestría	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura
8	Física	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura 6° Semestre
9	Física	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura 6° Semestre
10	Física	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura 6° Semestre
11	Física	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura 6° Semestre
12	Física	Doctor	> 15	Termodinámica relacionadas	Licenciatura 6° Semestre
	7 Químicos 5 Físicos	7 Grado de Doctor 1 Candidato a Doctor 4 Grado de Maestría	2 Profesores tienen menos de 5 años de experiencia. El resto rebasa los 15 años	Todas las asignaturas se relacionan con la Termodinámica.	Todos profesores de Licenciatura y Maestría

**FIGURA 4.5 Características generales de la muestra**

Cabe hacer una mención especial al Dr. Leopoldo García-Colín Scherer -actualmente investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Iztapalapa- quien gentilmente aceptó ser entrevistado. Por la extensión de su entrevista, su trayectoria, la importancia de su obra y la influencia que ha ejercido en el medio académico de este país relacionado con la termodinámica, sus respuestas serán presentadas en otro apartado. Contando al Dr. García-Colín, la muestra aumenta a trece y con él, se incluye a la UAM.

#### 4.4.3 La aplicación del instrumento

Diez entrevistas fueron audio grabadas en su totalidad. Una, por dificultades técnicas fue grabada parcialmente y en otra el profesor no aceptó ser grabado. En todos los casos se tomaron notas que fueron confrontadas, complementadas y detalladas con las grabaciones. Sin contar la entrevista realizada al Dr. García-Colín, que constó de 130 minutos, la duración de las entrevistas a los profesores fue de 30 a 90 minutos. El promedio fue de menos de una hora (48 minutos).

##### *4.4.3.1 Entrevistas a los Profesores*

En todas las entrevistas se compararon las notas con las grabaciones, las respuestas a cada pregunta fueron complementadas. No se consideró necesaria la transcripción detallada de todas las audio-grabaciones cuando las respuestas eran cortas, directas y puntuales, y había concordancia con las notas tomadas.

Las respuestas dadas por los 12 profesores a cada pregunta, se organizan en tablas y se presentan casi textualmente en las Figuras 4.6 a, b, c y d; en la Figura 4.8 se presenta en un solo Cuadro, el concentrado sintético de los datos obtenidos.

#### 4.4.3.2 Entrevista con el Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Los lectores de este trabajo, seguramente interesados en la termodinámica, reconocerán sin duda los muchos méritos del Dr. García-Colín por lo que no insistiremos en ellos. Nuestro interés se centra en sus respuestas proporcionadas a la Guía, pero más que interesarnos en la reproducción textual de cada una de ellas, nos enfocamos con atención a sus énfasis y a los señalamientos particulares que hizo el Dr. García-Colín en referencia a sus escritos relacionados con la entropía.

El Dr. García-Colín es un personaje singular que no es posible encasillar en solo una de las categorías que hemos utilizado en este trabajo, pues parece atravesarlas todas.

Es *constructor* de una caracterización para la entropía y por lo mismo *continuador*. Es también *difusor* y, como tal, lo hemos incluido como autor de su texto de Termodinámica. Tiene además una larga trayectoria como docente, como *profesor-reconstructor-transmisor* ha influido en numerosas generaciones de físicos tanto en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México como de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Por lo anterior creemos de importancia separar su participación del resto de los profesores para destacar sus aportaciones como *continuador* y como *constructor* de definiciones originales y poco conocidas para la entropía.

A través de las temáticas de la Figura 4.1 presentamos las respuestas dadas a la Guía por el Dr. García-Colín.

#### **A. En cuanto a las dificultades en la enseñanza.**

El Dr. García-Colín, menciona la necesidad de separar la Termodinámica macroscópica de la microscópica. Como antecedentes académicos deseables en el alumno, plantea el conocimiento de las leyes cero y primera.

#### **B. Concepción de la entropía y sus fundamentos.**

En cuanto a la definición, orígenes e interpretación física de la entropía, el Dr. García-Colín se remite y nos remite a su obra “De la máquina de vapor al cero absoluto”, (García-Colín, 2000) y particularmente a la obra “Entropía” (García-Colín, s.f.), editado por el Colegio de México.

Brevemente, se destacan de estas obras las interpretaciones que de acuerdo con este autor son las más utilizadas en la presentación del concepto de la entropía:

1. Como una medida de la disponibilidad de un sistema de convertir calor en trabajo.
2. Como una medida del desorden molecular.
3. Como una medida de una cantidad que establece la “dirección en el tiempo”.

Comentando cada una, el Dr. García-Colín señala que la primera proviene de los trabajos de Carnot (1824) y de Clausius (1854), la segunda tiene su origen en la interpretación molecular de los fenómenos macroscópicos que exhibe un sistema como un gas, un sólido o un líquido y que surge de los trabajos de Maxwell (1860) y Boltzmann (1872) y la tercera la exhiben los procesos naturales que se denominan procesos irreversibles y proviene de las ideas del propio Boltzmann.

Como nota adicional, al término de su obra sobre el concepto de entropía, García-Colín apunta que en 1949 el ingeniero y matemático Claude Shannon propuso una estructura conceptual, ahora conocida como Teoría de la Información, por medio de la cual es posible obtener una interpretación del por qué se puede asociar el concepto de entropía como medida del desorden molecular. Shannon, determinó un conjunto de reglas que significan orden y con ello cuantificó<sup>50</sup> el “desorden”. Shannon logró demostrar que su fórmula para el “desorden” concuerda con la definición probabilística de Boltzmann para la entropía. Situación que se cumple para un sistema en equilibrio cerrado y aislado. Sin embargo, García-Colín afirma que su generalización para el caso de sistemas fuera del equilibrio no ha sido aún posible.

Regresando a la Guía, las respuestas a las preguntas 4, 5 y 6 giran alrededor de la definición de entropía, que el Dr. García-Colín apunta “**como medida de la desorganización de un sistema**”, apresurándose a aclarar que la organización es entendida a través de la convención de que un sistema estará más organizado cuanto mayor sea el número de restricciones que se le impongan.

---

<sup>50</sup> Para el detalle de lo señalado para la entropía ver las obras citadas.

García-Colín argumenta que se construye esta definición a partir de las restricciones geométricas, mecánicas y térmicas que son necesarias para caracterizar todo sistema en equilibrio. Así, si en un sistema cerrado, aislado y en un estado de equilibrio, se remueve una restricción, se induce un proceso que lleva al sistema a un estado final de equilibrio con una restricción menos de las que tenía inicialmente. La entropía, desde esta perspectiva, también puede interpretarse como **“una medida de la falta de restricciones de un sistema”**.

### **C. Con Relación a la enseñanza.**

En las preguntas 5 y 6 de la Guía, relacionadas con la presentación de la entropía y su interpretación física, señala que en el desarrollo del concepto de entropía ante los alumnos, toma en cuenta esta interpretación y afirma que el aspecto histórico en su enseñanza ocupa un lugar tan importante como el que tiene en sus obras. La presentación de la entropía la inicia con Carnot, Kelvin y Clausius.

En la pregunta 8, destaca como científicos importantes a Clausius en la perspectiva macroscópica, a Boltzmann en la microscópica a Gibbs como generalizador de esas entropías, y a Shannon como introductor de otra interpretación para la entropía desde la teoría de la información. En la pregunta 9, explica la respuesta equivocada de los alumnos franceses, por su desconocimiento de los grados de restricción y por su confusión entre los procesos reversibles e irreversibles. Él esperaba -señala para la pregunta 10- que sus alumnos superaran estas dificultades y contestaran de manera correcta.

Con respecto al conocimiento de la expresión de Clausius (preguntas de la 11 a la 14) afirma conocerla pero con otros términos. No la ha estudiado, dice, ni la maneja o menciona a sus alumnos. Como conceptos importantes (pregunta 15) resalta a la temperatura, la energía interna y a la entropía.

Respondiendo a la pregunta 16, el Dr. García Colín considera como problemática para la evaluación de la entropía en la Termodinámica Clásica, el conseguir superar la continua interpretación metafórica con la que aparece la entropía fuera del contexto de la termodinámica. Se refiere a la interpretación de la entropía “como medida del desorden”, este es un reto enorme, pues es una interpretación promovida por cosmólogos, médicos e incluso otros científicos.

En la pregunta 17, considera que el alumno debe evidenciar que comprende que la entropía es una función de estado y que, como tal, no es correcto hablar de “la entropía de un gas”. Sólo es posible hablar de la entropía de un gas cuando está en un cierto estado esto es, cuando está sometido a una cierta presión y a una temperatura dada o a un volumen dado y a una presión dada. La entropía enfatiza, **debe ser comprendida como una función de estado**. De allí que cuando se pregunta ¿cuál es la entropía del universo, considerado como cosmos? la pregunta sólo podrá ser contestada si se sabe cual es el estado de ese universo o cosmos. Por otro lado, concluyendo las respuestas a la Guía con las preguntas 18 y 19, los libros que utiliza en sus clases (pregunta 18) son sus propias obras y son las mismas que recomienda a sus alumnos (pregunta 19).

Como comentario adicional (pregunta 20), el Dr. García-Colín destaca la separación que debe existir entre las entropías que llama de Clausius, la probabilística de Boltzmann y la de información de Shannon, y tener claro que solo bajo ciertas condiciones muy particulares la de Clausius concuerda con la de Boltzmann. Esto es, sólo concuerdan, cuando se formula la parte microscópica, (el aspecto microscópico de un sistema) asignando “a priori” la misma probabilidad a todas las casillas en las que pueden estar las partículas, sólo en este caso las entropías coinciden. Eso fue lo que Boltzmann hizo pero, si se cambian las reglas, las entropías son diferentes. En realidad Boltzmann se acogió al supuesto o hipótesis más simple: que el proceso que se lleva a cabo es un proceso al azar y asignó una probabilidad  $1/N$  al desorden completo. Pero de ahí a considerar a la entropía como medida del desorden, es una deformación en la enseñanza de la entropía, pues siendo así se tendría que definir primero que se entiende por “orden” o bien precisar “desorden respecto a qué”. Según el Dr. García Colín, la interpretación de la entropía como una medida del grado de organización del sistema es la correcta y es clara, pues se puede organizar el sistema en el laboratorio y se organiza de acuerdo a las paredes, de acuerdo a las variables termodinámicas. “Si se quita una restricción se induce a un proceso, el sistema realiza trabajo y la entropía aumenta. Si se quiere regresar a poner esa restricción se tiene que realizar trabajo sobre el sistema a expensas de una fuente externa y entonces, la entropía disminuye. **Esta es la interpretación clásica y correcta de la entropía termodinámica como una medida de la *desorganización* no del desorden que son dos casos muy diferentes**”.

En suma dice, dentro de la termodinámica, la entropía es una función de estado y sólo es aplicable para sistemas cerrados y cuando están en equilibrio. Para los estados que no están

en equilibrio, la entropía o no se puede definir o se puede definir en un número infinito de maneras.

Hasta aquí la entrevista con el Dr. Leopoldo García-Colín Sherer. De sus respuestas es posible constatar, aunque en este caso sea ocioso decirlo, la solidez y extensión de su saber académico, explícitamente manifestado tanto en sus obras como en la entrevista.

### **Ubicación de las respuestas. Comparación con las dimensiones.**

Con referencia a la dimensión histórica (Figura 4.2) y a los orígenes de ese saber, el Dr. García-Colín, dentro de la termodinámica clásica, asume el modelo de Clausius y lo enriquece al aportar una novedosa interpretación para la entropía. En la dimensión epistemológica, (Figura 4.3), la importancia que otorga a la historia y al individuo como constructor de conceptos y teorías, (respuestas a las preguntas 5 y 6) lo acerca epistemológicamente a la posición relativista y por otro lado, con relación a la dimensión de enseñanza (Figura 4.4) al adoptar como base para la presentación de la entropía la exposición de los trabajos de Carnot, Kelvin y Clausius, siguiendo la lógica del desarrollo histórico de la disciplina, adopta una posición mixta en su enseñanza, entre tradicional y activa con más énfasis en la exposición tradicional, pero con el rasgo de insistir en la comprensión en la evaluación de sus alumnos y de manifestar su preocupación de superar (cambiar) las ideas previas o preconcepciones detectadas en sus alumnos con respecto a la metáfora del desorden que asocian con el concepto de la entropía.

En suma, el Dr. García-Colín siendo un caso único en el campo de la termodinámica nacional, ejemplifica en nuestro ámbito el papel del constructor como se ha definido aquí (Capítulo 1), al detectar, (“*ver que*”) -a partir de su conocimiento disciplinario- la necesidad de llenar un vacío de claridad en el concepto de entropía y hacer una propuesta al respecto.

A continuación se presenta el análisis de los resultados de la entrevista con los doce profesores en su primera etapa, que corresponde a su comparación con las dimensiones y categorías analíticas. En la segunda etapa que se presentará en el Capítulo 5, se analizarán las representaciones de los profesores a partir de la noción de perfil epistemológico.

### **4.5 Análisis de los resultados. Cruces de las respuestas con las dimensiones**

En las Figuras 4.6 a, b, c y d se muestran las preguntas de la guía, una síntesis de las respuestas y los resultados de la entrevista aplicada a los doce profesores de la muestra. La Figura 4.7 muestra el concentrado general de las respuestas; y en la Figura 4.8 se presenta un resumen de los resultados en términos de frecuencias. Posteriormente se discuten los cruces de las respuestas de los profesores, con las dimensiones histórica, epistemológica y de enseñanza y sus categorías básicas.

<b>PROFESOR</b>	<b>1. Dificultades en la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica y la entropía</b>	<b>2. Conceptos antecedentes necesarios para la comprensión de la entropía.</b>	<b>3. Idea(s) previas del concepto de entropía.</b>	<b>4. Definición de la Entropía.</b>	<b>5. ¿Cómo introduce el concepto de entropía?</b>	<b>6. Representación física de la entropía</b>	<b>7. Papel del aspecto histórico ¿qué se resalta?</b>	<b>8. Científicos más importantes en relación a la entropía</b>
<b>1</b> Grado: Doctor Antigüedad: 3 años. Nivel: Maestría y Licenciatura 2º Y 3º Semestre	Concepción intuitiva poco formal el conocimiento. La problemática está en entender bien los conceptos.	Utiliza el desarrollo de Boltzmann a través de la probabilidad. En maestría da por hecho que tienen todo el conocimiento necesario.	En licenciatura, aparece la entropía como desorden, como desorganización.	S es el calor disponible para realizar trabajo. H es el calor con el que sí se trabaja. $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$	Inicia por situaciones absurdas y la imposibilidad de algunos procesos. Pero la desarrolla axiomáticamente siguiendo a Callen.	Cree que la comprensión física es más fácil desde Boltzmann Cantidad de calor que está disponible para realizar trabajo.	No lo toca o apenas.	Clausius porque la formaliza. Boltzmann desde lo microscópico. Gibbs.
<b>2</b> Grado: Maestría Antigüedad: 4 años. Nivel: Licenciatura en diferentes Carreras. 2º Y 3º Semestre	Carencia de bases matemáticas	Lo que aprendieron en los cursos anteriores.	S como desorden. No saben nada pero si aparece, relacionado con el desorden.	No da definiciones. Lo presenta a través de lecturas diversas, incluso de ciencia ficción para motivarlos y a través de la fórmula: $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$	A partir de Carnot Clausius Los motiva a través de lecturas varias, incluso de ciencia ficción.	La presenta como degradación de la energía. Flecha del tiempo y a través de las lecturas del Castelan y otros.	No lo maneja por falta de tiempo. A lo más menciona a Carnot y Clausius.	Carnot y Clausius porque Clausius desarrolla el concepto de entropía
<b>3</b> Grado: Maestría Antigüedad: Más de 15 años Nivel: 2º Y 3er Semestre	Entender que es una integral a partir de una diferencial exacta y a partir de una diferencial inexacta. Diferenciar calor y temperatura. Distinguir las variables que dependen de la trayectoria.	Energía – 1ª Ley Función del Estado	Medida del desorden o del caos.	La de Clausius. Cantidad de calor transferida por unidad de temperatura.	Ciclo de Carnot, construcción de la escala de temperatura, calor específico, capacidad calorífica y aproximación de Clausius a partir de Carnot.	Es una consecuencia de un análisis del Ciclo de Carnot y es una consecuencia de la 2ª Ley. Se relaciona con el grado de organización o desorganización de un sistema.	Si revisa los desarrollos de la 1ª y 2ª Ley y explica por qué desarrollaron esas leyes y no se vean las fórmulas como algo frío. Revisa con los alumnos los contenidos.	Carnot, Kelvin, Clausius, Los últimos hacen uso de los resultados de Carnot y el resto se basa en estos tres científicos.
<b>4</b> Grado: Doctor Antigüedad: 1ª vez Nivel: 2º Semestre (Lics. del área química: I.Q., Q., Q.F.B.)	Dificultades en el manejo de las matemáticas.	Principio de conservación de energía. Concepto de calor.	S como desorden.	La entropía es una propiedad termodinámica que ayuda a ver como va evolucionando un sistema bajo ciertas condiciones.	A partir de los Ciclos de Carnot, no "se mete" con la mecánica estadística.	Una propiedad termodinámica.	No juega ningún papel en su clase.	Clausius y Boltzmann
<b>5</b> Grado: Maestría 2º Semestre	El lenguaje, la confusión con los términos coloquiales, como ocurre con el uso de la palabra energía. Se requiere ver a la S como algo tangible. La distinción entre funciones de estado y de trayectoria. El reciente cambio de las unidades de calor a Joule/K.	Conocimientos matemáticos de álgebra y cálculo. El que dQ sea inexacta y se convierta en diferencial exacta al dividirla por T introduce una complicación matemática fuerte para los alumnos.	S relacionada con el desorden.	No da definiciones, proporciona las características de la entropía a saber: es una propiedad, existe, se puede evaluar.	Mediante Ciclos de Carnot (no menciona a Clausius). No la desarrolla con base en Callen por-que los alumnos no tienen las bases matemáticas para comprender ese desarrollo.	S: una propiedad de los sistemas. S: Proporciona un criterio de direccionalidad de los procesos. Advierte sobre la necesidad de incluir los alrededores. Menciona "estado de agregación" de los sistemas. S es la entrada a la energía libre de Gibbs.	No destaca el aspecto histórico, sólo menciona a Carnot y a Clausius.	Carnot y Clausius como necesarios para introducir a la entropía como función de estado y plantear la desigualdad de Clausius.
<b>6</b> Grado: Estudios de Doctorado terminados. 2º Semestre	No tienen pensamiento lógico matemático ni lectura de comprensión. No comprenden los textos de los problemas, No son capaces de transferir un texto a un lenguaje matemático. Sin embargo, no tiene problemas para que comprendan el concepto a través de ejemplos intuitivos. Se les dificulta entender que una diferencial inexacta es exacta al multiplicarla por un factor de integración.	Que conozcan la primera ley y la diferencia entre el calor y la temperatura.	Medida de desorden. Traen ideas de diferentes aplicaciones de la entropía a la economía y en otros campos.	S es un concepto que surge por necesidad, para dar cuenta de los cambios espontáneos y cuales no son espontáneos. Para cambios espontáneos la entropía aumenta.	Lo introduce a partir de Boltzmann recordando a los alumnos que existen la termodinámica clásica, estadística y cuántica. Les señala que Boltzmann introduce para la S el concepto de aleatoriedad.	Como criterio de espontaneidad de los procesos.	Menciona a Carnot y a Clausius.	Boltzmann, pues sin medir nada llega a la entropía.

**FIGURA 4.6a ENTREVISTAS (SÍNTESIS): Nivel Profesional / Profesores De Termodinámica Con Formación En QUÍMICA (preguntas 1-8)**

9. Problemática en la comprensión de S en la respuesta de los alumnos franceses.	10. Respuesta esperada de los alumnos ante la misma pregunta planteada a los franceses.	11. Conoce la relación de Clausius $\int dQ/T = \int dH + \int dZ$	12 o 13 Sí / No ¿Cómo puede interpretarla?	14. ¿Relación entre la expresión y su enseñanza?	15. Tres conceptos cuya comprensión es indispensable.	16. Problemática en la evaluación del concepto de entropía.	17. ¿Qué debe evidenciar el alumno para considerar que comprendió el concepto?	18. Tres libros que use como apoyo	19. ¿Recomienda esos mismos libros al alumno? ¿porqué?
<b>1</b> Predomina la concepción de la entropía como desorganización (desorden).	Cree que podrían contestar como los jóvenes franceses.	No	--	No existe	Las tres leyes y el concepto equilibrio. De hecho dedica tres clases para que quede claro el concepto de equilibrio.	No evalúa el concepto de entropía particularmente sino a través de otros relacionados.	Que lo aplique y que entienda la posibilidad de hacer uso de las fórmulas de manera aproximada. Aproximación que es muy útil para los ingenieros.	Castelan, Levine, Callen y otros libros americanos para dar en maestría mecánica cuántica.	Los mismos para que se acostumbren a diferentes notaciones que se manejan en cada uno.
<b>2</b> Simplificación del problema y no prestar atención a las condiciones del problema	Espera que contesten que la entropía permanece constante porque enfatiza en clase el análisis de las condiciones en las que se producen los procesos.	Cree recordar que algún profesor en licenciatura se las mencionó pero no conoce en realidad ni sabría interpretarlas	--	--	- Calor diferente de temperatura Las tres leyes. Que recuerden que la entropía del universo aumenta	Evalúa la comprensión a través de su aplicación en la resolución de problemas.	Que tome en cuenta las condiciones dentro de las cuales se plantean los problemas de aplicación y sepan usar las fórmulas.	Levine, Atkins, Castelan	Deja que cada alumno elija cual texto seguir de acuerdo a su estilo de aprendizaje.
<b>3</b> La entropía no se comprende con claridad y se toma el camino más simple de considerarla como desorden y éste asociado con el volumen.	En el caso reversible no hay aumento de entropía pero en el irreversible sí hay. Cree que contestarán correctamente porque resalta en clase estas diferencias.	No	--	--	Energía libre constituida por la entalpía y la entropía así que estos son importantes para aquella.	Encontrar los reactivos apropiados para la aplicación dentro de la ingeniería.	Saber que significan los valores numéricos para cada concepto y que identifique las ecuaciones básicas, dimensionalmente correctas.	Abbott y Vaness; Wallace; Heller Pues aplican la termodinámica a la ingeniería.	Son los mismos para los alumnos.
<b>4</b> No se dan cuenta de las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el proceso.	No sabe, pero cree que algunos alumnos responderán de manera análoga a los franceses porque a mayor volumen, mayor desorden.	No la conoce	--	El primer miembro de la ecuación es la entropía.	Las leyes de la Termodinámica.	No tiene ninguna experiencia previa. No ha evaluado aún ese concepto.	Debe resolver problemas conceptuales don-de existan experimentos mentales y otros con aplicaciones numéricas pero que enfatizen la capacidad de evaluar los límites (numéricos) que tienen las propiedades.	Greiner; Springer; Carrington. Son libros nuevos pues no le gustan los de uso actual por los profesores del área como el Atkins o el Castelan pues se enfocan a los gases ideales. El prefiere generalizar a otros estados.	No recomienda ningún libro en particular para evitar que el alumno se limite a ese libro. Los deja en libertad de buscar el que le parezca, o sea, el más adecuado a sus estilos personales.
<b>5</b> Olvido de la fórmula. Distracción de los alumnos y prevalencia de la idea de desorden.	Espera que contesten correctamente porque deducen la expresión y la aplican con frecuencia.	No	--	--	Calor Temperatura Entropía	El evaluar S a partir de los niveles de: — Operación — Comprensión — Aplicación — Generación	Enfatiza al manejo adecuado de los conceptos y una aplicación que sea estimativa o aproximada.	Chang, Levine, Abowitz, Castelan. También usa libros de química general porque son más elementales.	Son sencillos y comprensibles. Además tienen problemas tipo ya resueltos.
<b>6</b> En un sistema aislado habrá procesos internos hasta que la S sea máxima.	Espera que contesten correctamente.	No	--	--	Las leyes de la termodinámica.	Basta con que sepan aplicar las tres leyes.	La aplicación manifiesta la comprensión de los conceptos a evaluar. No es necesario más.	Castelan, Atkins, Laidler, Chang	Los deja en libertad de que elijan el que mejor se acomode a su estilo.

**FIGURA 4.6b ENTREVISTAS (SÍNTESIS): Nivel Profesional / Profesores de Termodinámica con formación en QUÍMICA (preguntas 9-19)**

PROFESOR	1. Dificultades en la enseñanza y aprendizaje de la Termodinámica y la entropía	2. Conceptos antecedentes para comprender la entropía.	3. Idea(s) previas del concepto de entropía.	4. Definición de la Entropía.	5. ¿Cómo introduce el concepto de entropía?	6. Representación física de la entropía	7. Papel del aspecto histórico ¿qué se resalta?	8. Científicos más importantes en relación a la entropía
<b>7</b> Grado: Ing. Químico; Mtra. y dial. en I. Q. Antigüedad: Más de 23 años de docente. Nivel: Profesor de todas las carreras de la Fac. de Quím. en termodinámica y otras.	El manejo de las matemáticas. Representación de los diagramas PV. Comprensión de una ecuación de estado. Manejo del lenguaje de la termodinámica Ecuación de los estados de los gases. Las dificultades anteriores se trasladan a la comprensión del concepto de entropía.	Construcción de un modelo matemático. La relación de T con las variables mecánicas del sistema para describirlo energícamente. 1ª Ley El concepto de entropía que es muy importante para los químicos.	En algunos de ellos que han cursado termodinámica en el ciclo medio superior, lo relacionan con "orden molecular".	S es la flecha del tiempo, es una variable contenida en la 2ª Ley que indica. Indica la direccionalidad natural (espontánea) de un proceso. S es un concepto más amplio que la descripción atómica de los estados de agregación. S calidad de la energía disponible	Lo desarrolla a través de los Ciclos de Carnot porque está indicado en el temario pero también a través del desarrollo de la ecuación energética empezando con la 1ª Ley, el planteamiento de las ecuaciones energéticas y la entropía.	Ya contestada en la pregunta 4. Se indica la direccionalidad natural, espontánea de un proceso.	El aspecto histórico si es útil para la docencia por ello mis alumnos leen el libro de García Colín, "De la máquina de vapor..." y otros y a partir de su discusión y aclaración de dudas, van precisando los conceptos. La entropía es el penúltimo tema del programa y se dispone de poco tiempo para revisarla a fondo	Prefiere no jerarquizar. Pone en un mismo nivel a Kelvin, Clausius y a Carnot.
<b>8</b> Grado: Doctor Antigüedad: Más de 15 años Nivel: Licenciatura en Física. 6º Semestre	La subestimación (importancia) de la termodinámica en los alumnos e incluso en los físicos.	Ninguno en particular, sólo la que ya se conoce de los cursos precedentes	Ninguna. A veces la S probabilística.	No usa definiciones se muestra su existencia a través de los procesos irreversibles de la naturaleza. Existen dos enfoques que conducen a dos entropías la S termodinámica y la S probabilística. La S se inventa para dar cuenta de los procesos irreversibles que se observan en la naturaleza.	A través de Carnot como herramienta para aclarar la existencia de la S, pese a que es una máquina reversible no existe S Sigue principalmente el desarrollo de Callen.	La naturaleza es asimétrica en el tiempo y eso es la entropía. Desde la observación de la naturaleza se encuentra que la S fija la dirección de los acontecimientos. La S aumenta en procesos irreversibles.	Se relata el desarrollo a partir de Carnot.	Carnot y Clausius
<b>9</b> Grado: Doctor Antigüedad: Más de 10 años en docencia. Nivel: 6º Semestre Carrera física	La deformación de los significados originales. Las temperaturas y la entropía han llegado a ser conceptos "torcidos" y poco claros. La termodinámica ha sido satanizada, desafiada, relegada. Se le califica como "que no es física" sino química y que es marca para y de los ingenieros.	Tener clara la primera ley para a partir de ella ampliar el concepto de energía a la energía de las fuerzas no conservativas.	Sabe algo de la primera ley, ciclos y mecánica estadística.	No utiliza definiciones, presenta a los alumnos diferentes interpretaciones, diferentes acepciones. Recalca los puntos finos de la conservación de la energía y menciona a Boltzmann, a Shannon y como la S es utilizada en otras áreas fuera de la física incluso en la llamada: Economía física.	Sigue a Callen como libro de Texto. Resalta el punto de vista energético (fuerzas conservativas y fuerzas no conservativas)	No plantea una sola interpretación. En realidad, la entropía no tiene interpretación física ni en Clausius. Callen presenta a la entropía como "medición de que tan anárquico es el sistema"	Lo histórico si juega un papel importante a partir de ella estimula la investigación de sus alumnos haciéndoles preguntas que tienen que responder investigando por su cuenta. Por ejemplo: ¿a qué controversia respondió tal o cual concepto? ¿Qué origen tiene la S?	1º Boltzmann por que formaliza y aclara el concepto de entropía pues va al fondo de los conceptos macroscópicos al ligarlos como valores promedio con lo microscópico. 2º Clausius, pues desarrolló el concepto. 3º Carnot, pero desde una perspectiva más de ingeniero.
<b>10</b> Grado: Doctor Antigüedad: Más de 15 años en docencia. Nivel: 3er Semestre en la Carrera de Física.	No ha detectado alguna problemática específica	Ley cero y la primera Ley.	Los alumnos hablan de la S del universo pero pensado el universo como cosmos. También aparece relacionada con desorden, con la información. Atribuye todo esto a la falta de conocimiento de la S.	Como Clausius $\Delta S = \Delta Q/T$	A partir de los Ciclos de Carnot menciona que la 2ª Ley sólo es referida a procesos cíclicos y hace que los alumnos se pregunten porqué.	Macroscópicamente: una pérdida de restricciones en el Sistema.	Si juega un papel. Habla de sus orígenes a sus alumnos. La termodinámica que ahora se enseña es la debida a Gibbs.	Clausius Kelvin Gibbs
<b>11</b> Grado: Doctor en Física Antigüedad: Más de 20 años en docencia en la carrera de Física. Facultad de Ciencias, UNAM	En la termodinámica fenomenológica no hay referentes directos para la entropía y eso dificulta su aprendizaje. Se confunden calor y temperatura. Se manejan estos conceptos de manera muy intuitiva y esto hay que cambiarlo. Confunden los procesos reversibles y los irreversibles.	Aplica un cuestionario para saber que conocen y es muy poco. Parte de allí para preparar su curso.	Grado de orden que implica un referente microscópico	No recurre a lo microscópico, solo menciona su existencia. La define como Clausius como aquella cantidad que se transforma que cambia en los procesos y los procesos son irreversibles.	Mediante el Teorema de Clausius y los motores de Carnot. Utiliza la analogía hidráulica. Proporciona muchos ejemplos. El aspecto axiomático no le toca.	Lo ya señalado en la pregunta 4.	Si lo utiliza y hace ver que las preguntas de Carnot en relación a la eficiencia de los motores térmicos siguen vigentes en los dispositivos térmicos actuales como los calentadores solares, refrigeradores solares, etc. La entropía es central porque aparece en la definición de energía que es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un desequilibrio térmico.	Clausius porque es el inventor del concepto.
<b>12</b> Grado: Dr. en Física. Antigüedad: Más de 20 años en la carrera de Física. Trabaja en la Fac. de Ciencias UNAM, en diferentes áreas: termodinámica, electrodinámica, mecánica cuántica.	Mal conocimiento de la termodinámica, cuando consideran al calor como fluido o como variable termodinámica lo que es erróneo. Conceptos como equilibrio y entropía no los conocen. Los profesores de nivel medio superior tendrán que profundizar en su conocimiento de la termodinámica. Muchas veces quienes imparten cursos de física no son físicos y confunden a los alumnos.	Indispensablemente deben saber y manejar el cálculo y las formas o ecuaciones diferenciales, pues los conceptos de la termodinámica se basan en las diferenciales exactas e inexactas.	Como medida del desorden, pero no saben de lo que hablan.	La definición que él maneja es que la entropía es el volumen en el espacio fase a partir de las coordenadas y de los momentos pues de esa manera puede dibujarse e incluso visualizarse.	A partir de Clausius	El concepto de orden y desorden pero referido al espacio fase. El orden (relacionado con el volumen) es mínimo en el espacio fase y en el desorden el volumen aumenta.	No lo toca. No lo cree necesario. La realización de investigación en física, requiere profundidad y dominio del lenguaje matemático. Cuando no existe el lenguaje matemático no se puede hacer física. La Termodinámica se basa en las matemáticas.	Carnot y Clausius en termodinámica, Gibbs y Boltzmann en la mecánica estadística.

FIGURA 4.6c ENTREVISTAS (SÍNTESIS): Nivel Profesional / Profesores de Termodinámica con formación en FÍSICA (preguntas 1-8)

9. Problemática en la comprensión de S en la respuesta de los alumnos franceses.	10. Respuesta esperada de los alumnos ante la misma pregunta planteada a los franceses.	11. Conoce la relación de Clausius $\left  \frac{dQ}{A} \right  = \frac{dT}{T}$	12 o 13 Si/No ¿Cómo puede interpretarla?	14. ¿Relación entre la expresión y su enseñanza?	15. Tres conceptos cuya comprensión es indispensable.	16. Problemática en la evaluación del concepto de entropía.	17. Qué debe conducir al alumno para considerar que comprendió el concepto	18. Tres libros que use como apoyo	19. ¿Recomienda esos mismos libros al alumno? ¿por qué?
7 No analizan el proceso y se dejan llevar por "la expansión" por el volumen y por la concepción de la S como desorden. Por ello, considera mejor trabajar con S entendida como flecha del tiempo y como energía útil.	Desearía que analizaran el proceso (como se realiza en clase) y contestarán correctamente. Pero no hay seguridad por la persistencia de las ideas previas en los alumnos	Cree reconocerla por haberla visto en algún curso de maestría pero no lo podría interpretar. Piensa que Z estaría relacionada con la energía.	--	--	El papel de los modelos en la ciencia. Energía útil. Entropía (considerado por Atkins como la idea brillante de la humanidad).	Se suele evaluar de manera indirecta pues no se dispone de problemas suficientes para evaluar conceptualmente cada término.	Usar el concepto y ser capaz de resolver problemas prácticos.	Castelan, que siguen parcialmente como texto; Levine; Atkins y además; Sears Zemansky; García Colín.	Los mismos pero eligen con libertad el que les convenga.
8 El problema está mal planteado pues, si hay procesos irreversibles en sistemas aislados térmicamente, la S aumenta. Cuando existe pérdida del control del sistema, (se quitan restricciones) la S del sistema aumenta y viceversa si la S aumenta implica que existió un proceso irreversible.	No lo sabe.	No	--	--	Tiene que comprender que: DQ no es una diferencial exacta pues se confunden mucho. Y los procesos irreversibles.	a) Que el alumno sea capaz de plantear las implicaciones de la S como las capacidades térmicas. b) La existencia de procesos irreversibles. c) Entender y describir que pasa con la S en procesos reversibles e irreversibles, calculando las entropías al final de los procesos. d) El límite de S en sistemas cerrados.	Callen (en sus dos ediciones); Pippard; Zemansky	Los mismos. Los alumnos usan evocaciones. El García Colín.	
9 Existe confusión de los procesos reversibles y los cuasi estáticos, un proceso reversible es diferente de un proceso cuasi estático, suelen confundirse pero no son iguales.	Espera una respuesta correcta pero si no se fijan es común que caigan en el error de que $\Delta S > 0$	No la conoce y no le concede ninguna importancia.	--	--	Las tres leyes.  Procesos reversibles y cuasi estáticos.  Equilibrio.	Los conceptos importantes los evalúa dentro de otras partes del curso porque allí se manifiesta la comprensión de los otros conceptos. Por ejemplo al evaluar la estabilidad termo-dinámica, allí se manifiesta la comprensión de otros conceptos como la entropía, la temperatura, el calor... Evalúa la comprensión conceptual y la aplicación. Deja problemas y realiza evaluaciones cada semana.	Callen; Crowford; Zemansky; Pippard Algunos son antiguos pero son buenos libros.	Recomienda los mismos libros a sus alumnos.	
10 No conocen o no saben usar la definición de entropía.	Contestarían correctamente porque se revisan en clase que ocurre con las variables cuando una de ellas permanece constante.	Sí; Z es el calor no compensado. Clausius trabajó con la termodinámica fuera del equilibrio y eso tiene que ver con la producción de entropía.	Estudia la termodinámica de procesos irreversibles	No la menciona por ser un curso de termodinámica.	T (temperatura) U (energía interna)  S (entropía)	Distinción entre los procesos reversibles e irreversibles.	Evalúa a partir de la aplicación correcta de los conceptos.	García Colín, Zemansky, Atkins.	Sí les recomienda los mismos. Los considera comprensibles para ellos.
11 Poca claridad en lo que es un proceso irreversible y un reversible.	Cree que 7 de 10 alumnos contestarán correctamente.	11 Sí, pero no lo conoce al detalle	--	--	Temperatura, energía interna, nociones de calor y trabajo y la entropía.	El principio del incremento de la entropía deben comprenderlo pero además deben ser capaces de aplicarlo.	Preguntas directas sobre los fundamentos de ese concepto. Aplicaciones y solicita lecturas y realización de ensayos. Para que el estudiante comprenda que los conceptos y la termodinámica es todavía una ciencia en construcción.	Sears Zemansky; García Colín; Castelan; Fermi; Callen.	Si se los deja también a los alumnos. Los considera accesibles.
12 Ignorancia, no la saben Interpretar.	Esperaría que no se confundieran pues les formula preguntas de ese tipo.	12 Sí.	No recuerda donde la vio pero considera que Z está relacionada con el trabajo.	Sí, pero bajo otra nomenclatura.	Todos, la entropía es un concepto tan importante como cualquier otro en la termodinámica. Pero sí juzga que la 2ª Ley presenta más dificultad para su comprensión que las otras leyes de la termodinámica.	La comprensión de los conceptos requiere de tiempo, pero el tiempo clase es escaso por lo que la comprensión total es difícil de alcanzar. La evaluación la realiza con base en la resolución de problemas fundamentalmente y a través de preguntas.	La aplicación conecta de los conceptos en problemas que los involucren.	Zemansky, García Colín y otros.	Los mismos pues son comprensibles.

FIGURA 4.6d ENTREVISTAS (SÍNTESIS): Nivel Profesional / Profesores de Termodinámica con formación En FÍSICA (preguntas 9-19)

N° Profesor	Dificultades	Antecedentes	IP sobre S	Definiciones de S	Introducción de S	Representación física de S	Papel de la historia	Científicos importantes	Problemática Que refleja la respuesta de los jóvenes franceses	Respuesta esperada por los alumnos propios	¿Conoce la expresión de Clausius?	¿Usa la expresión de Clausius?	Tres conceptos indispensables	Problemática en la evaluación de S	Evidencia para la comprensión de S	Tres libros de apoyo	Se recomiendan los mismos libros al alumno
1	Concepciones intuitivas no formales	Lo de cursos anteriores.	S como desorden.	Calor disponible para realizar trabajo.	Axiomáticamente (A)	Desde Boltzmann	No	Clausius Boltzmann Gibbs	Predomina S como desorganización (desorden)	Igual	No	No	Tres leyes y equilibrio.	Evaluación indirectamente	Uso de manera aproximada.	Callen Castelan Levine	Si
2	Sin bases matemáticas.	Lo de cursos anteriores	S como desorden	No da definiciones o $\Delta S = \Delta Q/T$	Históricamente H.	Degradación de E	No	Carnot Clausius	Simplificación del problema.	Correcta	No	No	Tres leyes $Q \neq T$ $S > 0$	Aplicación	Condiciones del problema.	Clausius Levine Atkinsons	Cada alumno elige
3	Sin bases Matemáticas.	E, 1ª Ley, función estado	S como desorden	La de Clausius	H	Grado de organización o desorganización	Sí	Carnot Clausius Kelvin	No se comprende S se toma el camino fácil de asociarla con el desorden y el volumen.	Correcta	No	No	E libre, S y H	Reactivos apropiados.	Sobre los valores numéricos para cada concepto.	Abbott Sélér Wallace	Si
4	Sin bases matemáticas	Q, 1ª Ley	S como desorden	Propiedad Termodinámica	H	Propiedad	No	Clausius Boltzmann	No atienden las condiciones.	Algunos igual, otros correctamente.	No	El 1º miembro es S	Las tres leyes.	No tiene experiencia.	Sobre los valores numéricos para cada concepto y problemas conceptuales.	Greiner Carrigton	Cada alumno elige
5	No ver S como algo tangible	Álgebra y cálculo.	S como desorden	No da definiciones, es una propiedad.	H	Propiedad, criterio de espontaneidad.	No	Carnot Clausius	Distracción y prevalencia de S como desorden.	Correcta	No	No	Q T S	Evalúa operación, comprensión y aplicación.	Manejo adecuado de los conceptos	Chang Castelan Levine	Si
6	Falta lectura de comprensión, sin bases matemáticas.	1ª Ley, construcción de modelos.	S como desorden	Concepto que surge por necesidad	A	Propiedad, criterio de espontaneidad.	No	Boltzmann	En un sistema aislado S es máxima.	Correcta	No	No	Las tres leyes	Que sepan las tres leyes.	Aplicación de las tres leyes.	Castelan Abbott Chang	Cada alumno elige
7	Ecuación de estado, sin bases matemáticas.	1ª Ley, construcción de modelos.	S como orden molecular.	Varias, flecha en el tiempo, dirección de un proceso, calidad de la E.	H	Indica la dirección espontánea de un proceso.	Sí	Kelvin Clausius Carnot	Se deja llevar por la expansión y por la S como desorden.	Correcta	Vagamente	No	Papel de los modelos, energía vital, S.	Se evalúa directamente	Aplicación del concepto.	Castelan Levine Abbott Sears	Si pero pueden elegir otro.
8	Subestimación de la importancia de la Termodinámica.	Los de cursos anteriores.	Ninguna, S probabilística.	No usa definiciones. Distingue entre S termodinámico y S probabilística	H y A con Callen	S fija la dirección de los acontecimientos	Sí	Carnot Clausius	Problema mal planteado pues S aumenta.	No sabe	No	No	dQ como diferencial no exacta.	Implicación de la S en procesos reversibles e irreversibles	Plantear los límites de S	Callen Pippard Zemansky	Si aunque usan el G. Colín
9	Subestimación de la importancia de la Termodinámica.	1ª Ley	No detecta	Sin definiciones, maneja diferentes interpretaciones, Boltzmann, Shannon.	A	No tiene Interpretación física	Sí	Boltzmann Clausius Carnot	Confusión, procesos reversibles e irreversibles.	Correcta	No	No	Tres leyes, equilibrio, procesos reversibles	Comprensión conceptual y aplicación.	Aplicación correcta.	Callen Zemanzky Pippard	Si
10	No detecta problemática específica.	Ley Cero y 1ª Ley.	S del universo pensada como cosmos. S como desorden.	La de Clausius	H	Macroscópicamente: pérdida de restricciones	Sí	Clausius Kelvin Gibbs	No saben la definición de entropía.	Correcta	Si	No	T U S	Distinción entre procesos reversibles y no reversibles	Aplicación correcta.	García Colín Zemanzky Abott	Si
11	No hay referentes directos para la S, manejo muy intuitivo.	Aplica un cuestionario.	Grado de orden	No recurre a lo microscópico. Lo define como Clausius.	H	Como Clausius	Sí	Clausius	Confunden procesos reversibles con irreversibles	Correcta	Si pero sin detalles	No	T U Q, S y W	Deben comprender y aplicar el principio de incremento de la entropía y preguntar	Aplicación correcta.	García Colín Zemanzky Abbot	Si
12	Q como fluido S es desconocido junto con equilibrio.	Cálculo y ecuaciones diferenciales	Medida del desorden.	Volumen en el espacio fase a partir de las coordenadas y de los momentos.	H	Como orden y desorden pero referido al espacio fase.	No	Carnot Clausius en termodinámica. Boltzmann y Gibbs en mecánica estadística.	Ignorancia, no la saben interpretar.	Correcta	Sí, pero no recuerda	No	Todos	La comprensión conceptual requiere tiempo y ejercitación.	Aplicación correcta.	García Colín Zemanzky Abbot	Si

FIGURA 4.7 Entrevistas. Cuadro concentrador

METAS	RESULTADOS
Dificultades percibidas por el profesor en sus alumnos	Sin bases matemáticas: 5/12; No ver S como algo tangible 1/12 Concepciones intuitivas: 2/12 Confusión en los términos: 1/12; Subestimación del área 2/12 Sin problema: 1/12
Definición de Entropía	En el total de los alumnos, la idea previa que se detecta por los profesores para la entropía es que es interpretada como desorden, En los profesores: La de Clausius: 4/12; Sin definición: 4/12; Propiedad termodinámica: 1/12 Calor disponible para realizar trabajo: 1/12; Con Boltzmann y otros: 1/12; Definición matemática: 1/12 S como concepto importante: 12/12
Representación física de la entropía	Microscópicamente (desde Boltzmann): 2/12; sin representación: 1/12; fija la dirección de los procesos espontáneos: 4/12. Degradación de la energía: 1/12; propiedad termodinámica: 1/12; como Clausius: 1/12 Macroscópicamente, pérdida de restricciones: 1/12; grado de organización o desorganización: 1/12.
Práctica docente) Presentación de la entropía	Desarrollo axiomático: 3/12 Desarrollo histórico: 8/12 Desarrollo mixto: 1/12
Modelo Predominante	Clausius (modelo macroscópico): 8/12 Boltzmann (modelo microscópico): 3/12 Mixto: 1/12
Conocimiento de la expresión original de Clausius	Desconocimiento: 9/12 Creer conocerla: 2/12 Dice conocerla pero confunde los términos: 1/12

**FIGURA 4.8 Resumen de los resultados en términos de frecuencias**

#### 4.5.1 Cruce: Respuestas - Dimensión Histórica

Con base en las categorías analíticas de la Figura 4.2, seis de doce de los profesores no otorgan ningún papel al aspecto histórico en sus clases, (preguntas 5, 7 y 8, Figuras 4.6, 4.7 y 4.8), pese a que tres de ellos fundamentan la presentación del concepto históricamente<sup>51</sup>. En otros tres profesores la presentación es axiomática.

Los nueve profesores que optan por la presentación histórica, o deciden basar su enseñanza en el enfoque más clásico de la termodinámica adoptan -tomando en consideración la dimensión histórica y sus categorías analíticas-: una visión o enfoque macroscópico de la materia, la transformación o cambio como noción base; y como herramienta matemática, el cálculo. Estas características los ubican dentro del Modelo de Clausius. Conviene anotar, que estos profesores asumen y siguen la presentación clásica de los libros de texto.

<sup>51</sup> El desarrollo histórico plantea la presentación del concepto de entropía basado en una línea cronológica con los estudios de Carnot como punto inicial, Kelvin, Clausius y otros.

El desarrollo axiomático desarrolla el concepto a partir de la lógica formal. La entropía en esta presentación es considerada un postulado, un axioma que no requiere demostración alguna. El aspecto histórico no es tomado en consideración.

Por otro lado, es interesante resaltar que sólo los tres profesores que desarrollan la entropía axiomáticamente, mencionan a Boltzmann como uno de los científicos importantes. Los demás no lo mencionan excepto un profesor que lo señala en su ubicación correcta dentro de la mecánica estadística. En suma: nueve de doce profesores siguen el Modelo de Clausius aunque desconocen su expresión original; tres de doce profesores siguen el Modelo de Boltzmann, y uno sigue un modelo mixto.

#### 4.5.2 Cruce: Respuestas - Dimensión Epistemológica

De manera análoga al cruce anterior, (Figura 4.3), las respuestas a las preguntas 1, 2, 5 y 7, permiten hacer las siguientes afirmaciones: cinco de doce profesores plantean como dificultad para su enseñanza la carencia de “bases matemáticas” por parte de los alumnos. Por otro lado, dos de doce de los profesores consideran una dificultad el “no ver a la entropía como algo tangible” (profesor 5), y el que “no haya referentes directos para la entropía” (profesor 11), pues eso origina “concepciones intuitivas y no formales” (profesor 1). Así, el peso que se otorga a la herramienta matemática, mas la necesidad de considerar a la entropía por su carácter abstracto como una “entidad inferida”, aunado a la escasa importancia que tiene el aspecto histórico como herramienta para la comprensión de la disciplina y a una evaluación de la entropía que seis profesores de doce recargan en “la aplicación correcta del concepto” (profesores 6, 7, 9, 10, 11 y 12), parecerían permitir concluir que algunos de esos profesores sustentan un enfoque lógico-empirista.

Sin embargo aunque esto fuese así, esta conclusión no puede ser inferida de la entrevista, toda vez que las respuestas están en relación con la enseñanza y sus dificultades y no con la posición epistemológica que sustentan, pero, lo que sí puede mencionarse, es que para la enseñanza de la entropía hay que aspectos que los profesores consideran importantes de ser atendidos, como es la necesidad de que los alumnos posean los conocimientos previos y la herramienta matemática que el manejo del concepto requiere. Esta necesidad, planteada por los profesores, hace ver que el aprendizaje se deposita en alto grado en la aplicación correcta del concepto en problemas relativos al área con todo el bagaje matemático que eso implica.

### 4.5.3 Cruce: Respuestas - Dimensión de Enseñanza

Considerando la Figura 4.4, la presentación de la entropía en todos los casos está a cargo del profesor. Las respuestas a las preguntas 5, 7 y 18, permiten suponer que el profesor, en una modalidad expositiva, proporciona conocimientos bajo la suposición de una lógica disciplinaria como un conjunto de hechos y conceptos. Sin embargo, los profesores 3, 7, 9 y 11 plantean además, la realización de investigaciones documentales y promueven su discusión en clase. Todos refieren plantear la solución de conflictos cognitivos y problemas de comprensión de los tópicos temáticos de la disciplina y además manifiestan su preocupación por el logro de un aprendizaje de comprensión y útil para la resolución de problemas. Los rasgos anteriores impiden la ubicación de los profesores en un enfoque único en la enseñanza pues aparecen características tanto de la enseñanza tradicional como de la activa.

En este punto conviene, en aras de una mejor comprensión de la enseñanza que aluden los profesores de la muestra, recurrir a la caracterización que hace Ernest (1993) de los paradigmas educacionales en su relación con el constructivismo como se planteó en el marco de análisis explicitado en el Capítulo 1.

Al respecto, por las metas y temáticas escogidas para las preguntas de la Guía y las respuestas proporcionadas, sólo es posible establecer comparaciones con las metáforas relacionadas con la enseñanza, teoría de aprendizaje y pedagogía. Haciendo las comparaciones correspondientes (Figuras 1.10 y 4.7), se observa que aparecen más acercamientos con el constructivismo trivial e incluso con el radical, que con el empirismo tradicional.

### **4.6 La Evaluación de la entropía por los profesores**

En la evaluación del concepto de entropía, la mayoría de los profesores destacan como criterios de logro la comprensión y la correcta aplicación del concepto en problemas específicos. Con relación a lo anterior se resalta lo siguiente. Se ha mencionado que cinco de los doce profesores consideran la falta de destreza o conocimiento de las “bases

matemáticas” como una dificultad para la enseñanza de la termodinámica. Esto hace suponer que ese conocimiento es necesario por un lado, para la comprensión del desarrollo disciplinario y por otro lado es necesario para el planteamiento y la solución de problemas de aplicación. Esto permite inferir la gran importancia que se otorga al plano aplicativo en el que siete de los doce profesores centran la evaluación de los conceptos en general y en particular, la evaluación del concepto de entropía.

De manera implícita, se hace descansar la enseñanza en una amplia ejercitación y en la resolución de problemas que impliquen la correcta aplicación de los conceptos en problemas específicos. Esto se ve confirmado cuando se constata que el libro de texto de Abbott y Vanness<sup>52</sup>(1991) -que se centra en la presentación de un gran número de problemas resueltos y sin resolver de aplicación conceptual- es el más mencionado.

#### Discusión y otros Resultados.

Como información interesante, se presenta una tabla con los libros que siguen al Abbott & Vanness en número de menciones. Es clara la influencia que los textos de Castelán (1980) y el de Zemansky (1968) tienen como libros de apoyo en los profesores de las Facultades de Química y Ciencias además de los textos de Abbott & Vanness (1991), Levine (1988) y el de Callen (1984) lo que muestra una diferencia entre lo que unos y otros profesores destacan del contenido disciplinario en su enseñanza. Esta situación es, por otro lado esperada, toda vez que los profesores entrevistados, contribuyen a la formación de profesionistas con prácticas laborales diferentes. Lo que sorprende es que la obra de García-Colín sólo se utilice en el ámbito de los físicos y no por todos ellos. Esto tal vez pudiera explicar la diversidad que aparece tanto en las definiciones como en las representaciones para la entropía en los profesores de la muestra (Figuras 4.6-4.8).

Con respecto a la definición de la entropía, la que prevalece con cuatro profesores es la que se adhiere a la definición de Clausius entendida en su formulación matemática. Otros cuatro profesores afirman que no plantean definición alguna para la entropía.

---

<sup>52</sup>Abbott & Vanness (1989) Termodinámica.Mc Grow Hill.

AUTOR	N° PROFESOR	FORMACIÓN QUÍMICA (Q). FÍSICA (F)
Abbott y Vanness (1991)	6	3 Q, 3 F
Castelán (1982)	5	5 Q
Zemansky (1968)	5	5 F
Levine (1988)	4	4 Q
Callen (1985)	3	2 Q, 1 F
García-Colín (1972)	3	3 F
Pippard (1981)	2	2 F
Chang (1977)	2	2 Q

Para textos con solo una mención, ver Cuadro Concentrador.FIGURA 4.7

En cuanto a la representación física de la entropía, en los 12 profesores de la muestra se despliegan ocho representaciones distintas.

1. Fija la dirección de los procesos espontáneos 4
2. De acuerdo con Boltzman 2
3. Sin representación 1
4. Degradación de la energía 1
5. Propiedad termodinámica 1
6. Como Clausius 1
7. Pérdida de restricciones 1
8. Grado de organización o desorganización 1

Está de más señalar que si tal diversidad se traslada a los alumnos sin la debida explicación, se corre el riesgo de aumentar su confusión en esta área. La diversidad en las representaciones para la entropía, sugiere la permanencia en la docencia del problema de la inexistencia de una representación que unifique su presentación y desarrollo.

Un intento en ese sentido es la propuesta de García-Colín, sin embargo su representación se descubre sólo en dos de los profesores de la muestra. Otros se salen ostensiblemente de la termodinámica clásica y representan a la entropía desde la perspectiva microscópica de Boltzmann. A estos dos profesores se suman los cuatro profesores que representan la entropía como “un criterio que fija la dirección de los procesos” pues esta representación proviene también de Boltzmann. De esta manera, seis de los doce profesores representan la entropía sustentados en un campo fuera de la termodinámica. Esto manifiesta una problemática adicional para el aprendizaje de la entropía, si esta “salida del campo” hacia la “mecánica estadística”, no es planteada y explicada con claridad al alumno.

Con respecto a la presentación del concepto, el desarrollo histórico es seguido por ocho profesores en concordancia con la propia evolución de la termodinámica y con el interés de profundizar en la comprensión de la génesis de la entropía. Por otro lado, el enfoque axiomático seguido por tres profesores, plantea un desarrollo que postula la existencia de la entropía para estados de equilibrio como una función monotónicamente creciente de la energía interna. Este desarrollo demanda de los alumnos el conocimiento y manejo de una herramienta matemática más sofisticada que la que exige el desarrollo histórico. Con ello se corre el riesgo de que la atención de los alumnos e incluso la del profesor, se traslade hacia la herramienta matemática y se soslaye el significado físico de los conceptos.

La percepción de una insuficiencia explicativa para la entropía a partir de la termodinámica, aparece como otra problemática de enseñanza que algunos profesores resuelven con la “fuga del campo”, adoptando presentaciones conceptuales microscópicas o mixtas como decide hacerlo un profesor de la muestra.

Los saberes académicos de los profesores en los niveles racional y explícito de Porlán *et al* (1997, 1998) se ven atravesados por los saberes, explícitos o no, provenientes de la experiencia y de otros conocimientos disciplinarios. Todo esto se conjuga y surge como apoyo, o en ocasiones como obstáculo, para la docencia. Cuando aparece como obstáculo, se origina otra problemática que podemos encontrar en nuestro caso, en algunas de las respuestas a la pregunta 9 (profesores 6 y 8). Estas respuestas, ejemplifican cómo el conocimiento de la termodinámica es atravesado por otro conocimiento proveniente de la perspectiva microscópica, que obstaculiza la comprensión del fenómeno en su enseñanza y aprendizaje.

Los profesores 6 y 8 cometen el mismo “error” que los alumnos franceses al “ver como” microscópico un problema planteado desde lo macroscópico y respondiendo (con mejores elementos que los alumnos) a partir de ese enfoque.

De esta manera, desde un saber ajeno al problema planteado, pero presente en su saber académico, complejizan innecesariamente el problema y su solución, tanto para sí como para los alumnos.

Continuaremos en el siguiente capítulo con el análisis de los resultados haciendo uso de las nociones de *multirrepresentacionalidad*, *perfil epistemológico*, *perfil conceptual* y *matriz disciplinaria* mencionadas en el Capítulo 1, nociones cuya utilización se vuelve indispensable a la luz de las direcciones que marcan las respuestas dadas por los profesores y necesarias para profundizar en su análisis e introducir las implicaciones que de allí se derivan para el campo de la enseñanza de la entropía.

## **CAPÍTULO 5. REPRESENTACIONES MÚLTIPLES. ENSEÑANZA DE LA ENTROPÍA**

Hemos mantenido la línea del seguimiento histórico del concepto de entropía a lo largo de más de un siglo, a través del estudio de quienes hemos llamado constructores, continuadores y difusores. Con ello se ha podido constatar que, fuera de algunos muy escasos investigadores que la mencionan, la expresión matemática original de Clausius, la expresión ampliada para la entropía, ha sido olvidada.

A lo largo de esta investigación hemos confirmado este olvido tanto en los continuadores como en los difusores y hemos defendido la idea de que ese olvido constituyó una pérdida para la enseñanza del concepto y que, la confusión en la comprensión de la entropía que todavía prevalece se debe, en parte al menos, a ese olvido.

Calificamos este olvido como pérdida pensando en el campo educativo de la termodinámica, en el que, en todos los niveles, los esfuerzos docentes para hacer asequible y entendible la entropía parecen vanos.

En el desarrollo que sigue, se plantearán argumentos a favor de lo afirmado y se terminará este trabajo con algunos elementos para considerar maneras diferentes de estructurar la enseñanza de la entropía.

Como primer punto, se continuará con el análisis de las representaciones de los profesores incorporando para ello, las nociones de perfil epistemológico y conceptual y, revisaremos brevemente las implicaciones que para el profesor y para la enseñanza conlleva la elección de libros de texto con cierta orientación en el desarrollo de su contenido. Como segundo punto, ya en el ámbito de la enseñanza de la entropía, se presentarán como ejemplo algunas experiencias de enseñanza de la entropía y de la termodinámica, para resaltar y tomar en consideración algunas ideas que otros profesores han probado y destacan como importantes. Se terminará este capítulo con la exposición de elementos que pueden coadyuvar a mejorar la enseñanza de la entropía.

## 5.1 Definiciones y representaciones para la entropía en los profesores entrevistados

Los resultados de la entrevista reportados en el capítulo anterior, conducen a la identificación de 5 definiciones y 7 representaciones físicas para la entropía, todas enunciadas explícitamente por los 12 profesores de la muestra. Esos números tan altos de definiciones y representaciones diferentes para el mismo concepto en una muestra de profesores tan reducida, constituye una prueba más de la dispersión nocional y representacional que rodea a la entropía, también en el campo de la práctica educativa.

Se enlistan a continuación, de manera textual, las cinco definiciones y las siete representaciones físicas para la entropía, con la relación de cuantos profesores las suscriben y la formación de éstos<sup>53</sup>.

### Definiciones:

1. Desde Clausius<sup>54</sup> (4/12) [2Q 2F]
2. Propiedad Termodinámica (1/12) [1Q]
3. Calor disponible para realizar trabajo (1/12) [1Q]
4. A partir de Boltzmann<sup>55</sup> (1/12) [1F]
5. Definición matemática (1/12) [1Q]
6. Sin definición (4/12) [2Q 2F]

### Representaciones:

1. Fija la dirección de los procesos espontáneos (4/12), [3Q, 1F]
2. A partir de la visión microscópica, desde Boltzmann (2/12) [1Q, 1F]
3. Degradación de la energía (1/12) [1Q]
4. Propiedad termodinámica (1/12) [1Q]
5. Como la representación de Clausius (1/12) [1F]
6. Macroscópicamente, como pérdida de restricciones (1/12) [1F]
7. Grado de organización o desorganización (1/12) [1Q]
8. Sin representación (1/12) [1F]

<sup>53</sup> El número de profesores con relación al total con el paréntesis redondo, la formación disciplinaria en el paréntesis cuadrado, Q por los profesores con formación en química y F por profesores con formación en física.

<sup>54</sup> Esta declaración se ha interpretado como aquel desarrollo que se inicia con el estudio de los ciclos de Carnot, hasta obtener la expresión conocida de Clausius .

<sup>55</sup> Lo que hemos interpretado que se introduce la entropía a partir de consideraciones microscópicas y probabilísticas.

¿Alguna representación o definición es la correcta?

Desde el punto de vista de los profesores, todas son correctas pues no existe, como se ha reiterado, una representación o definición única y consensuada para la entropía con la que pudiera establecerse una comparación. A lo más, hay cierto acuerdo en seguir la presentación de Clausius en el enfoque macroscópico, y la de Boltzmann en el microscópico. Sin embargo el acuerdo no es total pues, de los 12 profesores de termodinámica clásica, macroscópica sólo 4 se adscriben a Clausius.

### De las definiciones

Conviene destacar aquí que a partir de las definiciones es posible tener atisbos<sup>56</sup> de la *significación conceptual* y el sentido disciplinario que predomina (en una respuesta improvisada) en los profesores. Por ejemplo, la contestación de 4 profesores en cuanto a que la definición para la entropía es “como la de Clausius” hace suponer que adoptan la expresión:  $\Delta S = \int dQ_{\text{rev}}/T$  misma que, fuera de su descripción, sólo posee significado matemático. Así, sumando a estos 4 profesores los 4 que no se comprometen con ninguna definición pero que seguramente presentan a la entropía con la misma relación matemática, y si a ellos se añade al profesor que explícitamente declara que define a la entropía matemáticamente, para 9 profesores de los 12, el sentido disciplinario queda limitado a la interpretación matemática que el propio Clausius le otorgó<sup>57</sup>.

Así, a partir de estas definiciones, el nudo que corresponde a la entropía en la trama disciplinaria de la termodinámica, quedaría rodeado por las proposiciones lógicas que le dan un sentido matemático. Al observar las definiciones puede destacarse que, el profesor que define a la entropía como el “calor disponible para realizar trabajo” revela cierta confusión respecto al concepto y asume, quizás sin conciencia, la noción de calórico. La definición “a partir de Boltzmann”, describe la necesidad de un profesor de “salirse del campo macroscópico” para definir la entropía.

<sup>56</sup> Las características de la Guía y el desarrollo de la entrevista, que no fue realizada a profundidad, no aporta elementos para el detalle o la precisión.

<sup>57</sup> Desde luego sin desconocer que dicha expresión se asienta como, se ha mencionado, en el estudio de los ciclos termodinámicos en la relación entre calor y trabajo y en las transformaciones energéticas.

¿Cuál es entonces la definición de entropía?

Sólo cabe concluir que dentro de la termodinámica clásica tal como ha sido desarrollada por los continuadores, difundida por los autores de texto y transmitida por los propios profesores entrevistados, la entropía no tiene más definición que la expresión matemática de Clausius, lo que revela la insuficiencia de tal definición para la comprensión conceptual de la entropía y refuerza la necesidad de plantear su introducción con los elementos que proporciona el propio Clausius en la expresión ampliada para la entropía.

### **De las representaciones**

Si de las definiciones se desprenden atisbos de la *significación disciplinaria* que el profesor ha adquirido, originadas fundamentalmente, a partir de los libros de texto con los que se ha formado, las representaciones mencionadas a su vez, proporcionan elementos para identificar la *significación perceptual* de los profesores. Cabe recordar que la *significación disciplinaria* se le impone al sujeto desde el exterior (por los constructores, continuadores, difusores...) y le es ajena; mientras que en las representaciones el sujeto interviene en su elaboración, es una selección o elaboración personal a partir de una *percepción significada*.

En las representaciones, cada elección de los profesores destaca aquel atributo que desde su percepción “*ve como*” el más representativo-físicamente- para la entropía. No sorprende que sean mayoría (4/12), los profesores con formación química quienes resalten que la “entropía fija la dirección de los procesos” (junto con un físico). El resto de las representaciones solo tienen un profesor que las sostiene en cada caso, excepto la representación microscópica con 2 profesores, un químico y un físico.

A diferencia de los profesores con formación química, en los físicos no se comparten representaciones de manera explícita. Cada físico plantea una representación diferente. La *significación perceptual* para la entropía en los profesores de la muestra, pasa por Clausius con un sentido matemático sin representación física; por la direccionalidad de los procesos espontáneos, por la pérdida de restricciones en el sistema y se escapa hacia el plano microscópico con Boltzmann.

Una observación cuidadosa permite distinguir en este recorrido representacional, las zonas que se mencionan y que constituyen el perfil epistemológico de Bachelard (1968, pp. 36-44) noción con la que es posible profundizar este análisis pues con ella pueden expresarse las diferencias de significación perceptual de los profesores.

### 5.1.1 Perfil Epistemológico para el concepto de entropía.

Al respecto, como características principales del perfil aludido, reproducimos el siguiente párrafo debido a Mortimer (1995, pp. 267-285):

De acuerdo con Bachelard es posible determinar para cada individuo su perfil epistemológico relacionado con cada concepto científico... Bachelard ilustró su noción de perfil conceptual con el concepto de *masa*, a través de tres niveles: (el **realista**) corresponde a nuestras nociones cotidianas con fuertes raíces en un razonamiento del sentido común.

El segundo nivel del perfil (el **empirista**) corresponde en la masa, a la determinación precisa y objetiva del concepto dada por el uso empírico de instrumentos con escalas de medida. El uso del instrumento substituye las experiencias primarias del nivel realista.

El siguiente nivel (el **racional clásico**) está relacionado con su uso dentro de un cuerpo de nociones y no meramente como un elemento primitivo de experiencia directa e inmediata. Con Newton, por ejemplo, la masa es definida como una relación entre la fuerza y aceleración. La fuerza, la aceleración y la masa establecen una relación que es claramente racional.

Finalmente, con el advenimiento de la relatividad, el concepto de masa devino a ser un concepto complejo (en el nivel racional moderno) dependiendo de un cuerpo de nociones más complicado. En la física relativista la masa ya no es más, diferente a la energía

Complementamos citando a Bachelard (1968), una noción simple deviene en una compleja sin que se abroguen las demás nociones en los otros niveles.

Para nuestro análisis, subrayamos la afirmación de Bachelard (1968) de que en cada individuo puede ser rastreado un perfil epistemológico para cada concepto<sup>58</sup>, con una representación del concepto a cada nivel (realista, empírico y racional) y que, esas representaciones **coexisten** sin que se generen contradicciones entre ellas, toda vez que

<sup>58</sup>Por ejemplo, en el trabajo de Gallegos (2002) trata con el perfil epistemológico del concepto de Presión.

cada representación es dependiente de un contexto particular y es en ese contexto en el que es utilizado.

Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos de los profesores de nuestra muestra pues el rasgo destacado por ellos en su representación para la entropía, es sólo uno de otros más que sin duda hubieran aflorado en una indagación más profunda. Así, podemos aseverar que *la totalidad de los profesores de la muestra, posee cada uno un perfil epistemológico para la entropía tal que diferentes representaciones coexisten en ellos.*

Con estos elementos es posible darse cuenta que si bien, por la índole abstracta del concepto de entropía, todas las representaciones se ubican en el nivel racional, dentro de ese nivel se distinguen a su vez acercamientos a los otros niveles: al realista por ejemplo, cuando se piensa en la entropía como “la que determina la dirección de los procesos espontáneos” representación más ligada con las experiencias cotidianas, o con el nivel empírico cuando se representa a la entropía como “propiedad termodinámica”, representación que ayuda a ver cómo evoluciona un sistema y también en este nivel empírico, al representarla como “pérdida de restricciones” mismas que pueden ser susceptibles de ser manipuladas en el laboratorio.

Los niveles propuestos por Bachelard (1968), se corresponden además con niveles y zonas de complejidad creciente. La jerarquía entre las diferentes zonas implica que cada zona sucesiva, está caracterizada por tener categorías con un poder explicativo mayor que la que le antecede.

Desde esta perspectiva, la complejidad de la entropía puede entenderse porque “nació compleja” en el nivel racional, aunque con débiles raíces empíricas asentadas en la ingeniería práctica de Carnot y apoyada mas bien en *gedankenexperiments* (experimentos pensados). La entropía entonces, a diferencia del ejemplo con la masa, no deviene compleja, *es compleja de origen* y se asienta en el último nivel de Bachelard: el racional.

Su aprehensión es difícil para todos y constituye un reto mayúsculo para la enseñanza. Los profesores con sus definiciones y representaciones, revelan parcialmente al contenido del perfil que han construido para la entropía pero, sobre todo, revelan los aspectos que destacan para su comprensión sea para sí mismos o para sus alumnos.

Dentro de la termodinámica fenomenológica el profesor, de manera estricta, no tendría por qué interesarse en conocer otros campos disciplinarios como puede ser el referente a la mecánica estadística. Sin embargo, la historia de la disciplina y muy particularmente el desenvolvimiento del concepto de la entropía, hacen casi obligado que aún el profesor de termodinámica más ortodoxo, conozca y esté familiarizado con la mecánica estadística y con los trabajos de Boltzmann. Esto hace que el perfil epistemológico para la entropía se amplíe y que al pasar al nivel microscópico se incremente la complejidad del concepto, siempre ubicados dentro de la misma zona racional de Bachelard.

Es de esperarse entonces que en un profesor de termodinámica típico, **coexistan** planteamientos representacionales y definitorios para la entropía provenientes al menos de los dos campos mencionados. La delimitación de la entropía en cada campo debe ser cuidadosamente vigilada y, en todo caso, si la concepción microscópica es mencionada en el aula, ser explicitada y explicada a los alumnos para evitar incrementar la confusión en el “*mirar como*” y en el uso de una noción compleja ya de suyo.

Aún en profesores con amplia experiencia como la que poseen los que constituyen nuestra muestra, la vigilancia se relaja y con ello se suele caer en consideraciones equívocas ante situaciones tan comunes como la que fue presentada por Brosseau y Viard (pregunta 9 de la Guía). Ante ella el profesor 8 manifiesta: “el problema está mal planteado pues sí hay procesos irreversibles en sistemas aislados térmicamente. La entropía  $S$  aumenta, cuando existe pérdida del control del sistema. Esto es, si se quitan las restricciones, la  $S$  del sistema aumenta y viceversa, si la  $S$  aumenta implica que existió un proceso irreversible”.

La situación, recordemos, es la de una expansión adiabática en la que el cambio en la entropía es nulo. Sin embargo, la respuesta del profesor revela otros conocimientos que se convierten en obstáculos para visualizar la situación más simple planteada como problema. Ese conocimiento adicional complejiza innecesariamente el problema, pensándolo y colocando su mirada *dentro del sistema* e introduciendo elementos que no fueron considerados en la situación planteada.

El profesor hace uso de la definición propuesta por García Colín, (en la que la entropía depende de las restricciones del sistema), y no del manejo esperado y directo de la expresión matemática de Clausius en la que el cambio en el calor no existe, es nulo y por tanto también lo es el cambio en la entropía.

Lo anterior hace necesaria la discusión con los alumnos de este tipo de preguntas de engañosa sencillez pero útiles para ejemplificar la diferencia de respuestas que se generan según el marco teórico disciplinario que “determine o sesgue la mirada”. Pero, ¿de dónde proviene el perfil epistemológico del profesor?, ¿en qué fundamenta sus representaciones?

## **5.2 Dos Actitudes Epistemológicas o Representaciones Mentales en la Termodinámica**

La Figura 1.2 del Capítulo 1, muestra los planos de influencia para el alumno pero también los que influyen al profesor en la rama disciplinaria en la que adscribe su docencia. El plano más cercano y directo es el correspondiente a los libros de texto, en el entendido que hacemos referencia a aquellos que conformaron su marco y material de estudio para su saber disciplinario y a aquellos –los mismos u otros- que el profesor considera adecuados para su docencia. En un plano de influencia menos directa se contempla a los historiadores, a los continuadores y a los críticos de la disciplina que enseña. El tercer plano de influencia, el más alejado, prácticamente ajeno para la mayoría, está constituido por los propios constructores disciplinarios con sus trabajos y obras originales.

Lo deseable en la formación de todo profesor es que, efectivamente, su saber disciplinario se construya y sea consecuencia de cada una de las influencias reseñadas, pero lo común es que los perfiles epistemológicos y las representaciones provengan en una primera instancia de los libros de texto. Como se mostrará más adelante esos libros de texto, a su vez, son el producto de las reflexiones, representaciones y selecciones realizadas, por los que hemos llamado “difusores”, desde una *percepción significada*.

En el Capítulo 3 obtuvimos, con el estudio de una muestra de 24 libros de texto, un panorama de la presentación y representación de la entropía, plasmando lo encontrado en las Figuras 3.2a, 3.2b, 3.3 y 3.4. y en las consideraciones enunciadas al final del capítulo. Aquí destacamos algunos elementos de una investigación que consideramos complementaria y coincidente con varios de nuestros planteamientos, debida a Tarsitani y Vicentini (1996). Estos autores analizan varios libros de Termodinámica, con el propósito de mostrar que dentro de la ciencia y de la termodinámica en particular, están presentes dos actitudes epistemológicas o “representaciones mentales” como también las llaman, que se reflejan en los libros de texto.

Al respecto, afirman que diferentes libros de texto pueden exponer la misma materia acordando en muchos aspectos fenomenológicos y teóricos, pero discordando no sólo en la estructura lógica y en la definición de conceptos fundamentales, sino también en el alcance y el objeto de la materia.

Los autores presentan los libros seleccionados a través de la utilización de los mapas conceptuales de Novak (1984), con los que es posible visualizar las dos actitudes o representaciones mentales que subyacen en la estructura de los libros de texto de termodinámica reconocidos como clásicos. Estas actitudes epistemológicas o representaciones mentales son:

- 1) la representación fenomenológica basada en el concepto de equilibrio y
- 2) la que se basa en la consideración de procesos.

Como característica principal y definitoria, en la primera representación, el tiempo no juega papel alguno, en la segunda sí. Los textos clásicos de Planck (1945) y Maxwell (1904) se corresponden con la primera y la segunda representación respectivamente y es importante subrayarlo porque son la base de otros textos más recientes como son los libros correspondientes a Zemansky (1968) y a Callen (1985).

Sobre los libros clásicos se citarán los comentarios de Tarsitani y Vicentini (1996, p. 64), para enseguida con esa base, revisar los libros de texto más mencionados por los profesores de nuestra muestra:

La elección de Planck (en su libro de texto), es la de presentar la termodinámica de una manera fenomenológica pura. Las leyes de la termodinámica son puestas como leyes autosuficientes con una amplia base empírica y sobre todo con el mismo estatus fundamental... De acuerdo con Planck la entropía es un concepto tan primario como la energía y debe ser entendida sobre la base de la evidencia fenomenológica. Por tanto su significado debe ser encontrado en la intrínseca direccionalidad de los fenómenos naturales con ninguna referencia al mundo microscópico.

Por tanto, la irreversibilidad de los fenómenos naturales en contraste con el carácter ideal de los procesos reversibles es el punto de partida que no requiere de mayor explicación.

### 5.2.1 Las Representaciones en los Libros de Texto más Citados por los Profesores

De la cita anterior, correspondiente al texto de Planck, observamos de inmediato que la representación física para la entropía con el mayor número de menciones en los profesores de la muestra (4/12), se corresponde casi palabra por palabra con la que propone Planck, misma que es retomada en los libros que lo tienen como base. El texto de Zemansky (1968) es uno de ellos y es el que es mencionado como libro de apoyo por todos los físicos de la muestra (5/5). Lo señalado refuerza positivamente la hipótesis de que las representaciones en los profesores tienen su origen o son influidas por los libros de texto.

El libro de Planck, abundan Tarsitani y Vicentini (1996), consta de cuatro partes. Las primeras tres están basadas en el desarrollo de las tres leyes de la termodinámica. La cuarta y última parte abre el camino para los potenciales termodinámicos y para la interpretación microscópica. La existencia del equilibrio es esencial aquí para definir las cantidades termodinámicas por lo que la termodinámica de Zemansky, que lo toma como modelo, es una Termodinámica Macroscópica de Equilibrio, seguida de una Termodinámica Estadística de equilibrio.

Siendo éste el libro de apoyo por excelencia para los físicos entrevistados, sin sorpresa constatamos que “la presentación” que declaran para el concepto de entropía, (pregunta 5 de la Guía), se corresponde con el desarrollo clásico histórico que sigue el propio libro de texto de Zemansky (1968), que en última instancia se corresponde también con el de Planck.

Por otra parte, el libro de Maxwell (1904), ya en su título -Teoría del Calor- muestra que el calor para este autor constituía el problema central de la termodinámica y por tanto, le otorga en su texto una especial atención a los aspectos fenomenológicos de los procesos térmicos que son necesarios para la introducción de la entropía a través de las máquinas térmicas.

A su vez el libro de Callen (1985), enmarca su texto en la formalización axiomática de la termostática de Gibbs. En el texto de Callen, la fenomenología del equilibrio y de proceso, son tomadas ambas, junto con la estructura atómica, como el conocimiento de base que guía la construcción de la teoría. De éste y otros textos es posible descubrir, (Tarsitani y Vicentini, 1996) dos planteamientos epistemológicos.

- i.* Uno operacional, que sigue la aproximación de Caratheodory, la cual trata de dar una definición de las entidades abstractas en términos de observables (por ejemplo, la energía interna es definida a través del trabajo adiabático).
- ii* Otro teórico, que descansa en la correspondencia entre los hechos conocidos y la estructura abstracta de la teoría como un todo.

Planck y sus seguidores se adscriben al primer planteamiento que resalta la necesidad de dar un significado a los términos abstractos en términos observables, esta posición es también la de Clausius por lo que los acerca al empirismo de Hume (Figura 1.6). Por su parte, Maxwell, Callen y otros, encajan más en el segundo planteamiento, mismo que se aproxima al logicismo (Figura 1.6).

Es importante destacar que trabajos como el de Tarsitani y Vicentini (1996), advierten al profesor de que la influencia de los libros de texto no está limitada a la mera exposición de un contenido disciplinario sino que incorporan, tácitamente, las posturas epistemológicas y ontológicas que sustenta el autor; en una *percepción significada* de la disciplina que se instila en el lector desprevenido. Conviene que lo anterior sea motivo de reflexión para aquel profesor que busque un texto concordante con la *significación disciplinaria* propia y esté interesado en una construcción independiente y razonada de sus representaciones conceptuales como es la del concepto de la entropía.

### 5.3 Diversas Aproximaciones para la Enseñanza de la Entropía

Consideramos apropiado presentar en este punto, como antecedentes a nuestra propuesta, algunos esfuerzos didácticos realizados por profesores que buscan otras opciones para enseñar la entropía.

#### 5.3.1 Experiencias de Profesores

El panorama que hemos podido construir hasta aquí y del que se ha dado cuenta, genera una problemática para la enseñanza de la entropía que ha dado lugar a que profesores y estudiosos del campo no sólo elaboren propuestas de cómo enseñar la entropía y la termodinámica, sino que las han llevado a la práctica, al aula.

Expondremos enseguida, muy brevemente, algunas propuestas y experiencias como ejemplo de cómo los profesores *ven* el problema de enseñanza y cómo lo resuelven para, con base en nuestro estudio y algunas ideas desprendidas de estas experiencias, presentar elementos que posibiliten estructurar de otra manera la enseñanza de la entropía.

#### **Hans U. Fuchs** (1987, pp. 215-219)

Este profesor promueve una enseñanza de la entropía apoyada en las ideas de Callendar (1911), Job (1972), y Falk (1983) en el sentido de facilitar la comprensión de la entropía a través de: equipararla con una concepción de calórico, como lo sugiere Callendar, equipararla al calor de acuerdo a Job y de equipararla a una de las cantidades que “parecen sustancias” como propone Falk. La idea de la entropía como calórico es defendida por Callendar (1911) a partir de las siguientes palabras: “Clausius dio el nombre de entropía y la definió como la integral de  $dQ/T$ , definición que sólo es atractiva para los matemáticos. Haciendo justicia a Carnot, la entropía debió llamarse calórico y ser definida como  $W=\Delta Q(T-T_0)$ ...” o, dice Fuchs, llamarla calor como propone Job (1972), o con Falk (1983) quien sugiere enseñar la física a través de las cantidades que parecen sustancias (*substancelike*) como son la carga y otras.

La entropía sería entonces portadora de energía. En este sentido, Fuchs hace una propuesta ecléctica y, con base en las ideas de estos tres autores, sigue con sus alumnos una secuencia de enseñanza con la que van construyendo poco a poco un concepto de calor con propiedades tales que coinciden con las de la entropía. Al respecto dice,

“Como Callendar y Job creo que es más fácil entender la noción de calórico o calor y buscar una cantidad térmica, un fluido, una sustancia y equipararla posteriormente con la entropía...yo siempre dejo que mis alumnos escriban un ensayo sobre ¿Qué es el calor?, los ensayos demuestran que las concepciones precientíficas de los alumnos acerca del calor, pueden servir como una base para posteriores exploraciones. Para ser específico, - dice Fuchs- si los estudiantes describen los fenómenos térmicos usando sólo el término de calor, ellos correctamente lo usan en el sentido de la entropía. Posteriormente dejo que mis estudiantes estudien algunos fenómenos térmicos como calentamiento, enfriamiento expansión y compresión de gases y otros. Después de ello redesciben las propiedades del calor como siguen: El calor es una cantidad como sustancia (*substancelike*) la cual puede fluir a través del espacio (i.e. satisface una ecuación de continuidad). Y puede ser creado, pero no puede ser destruido. Esta cantidad es lo que los físicos llaman entropía” Fuchs (1987, p. 217).

Al final, Fuchs afirma que aunque su desarrollo difiere del clásico, los alumnos entienden la presentación de la entropía sin confusiones, por lo que considera que su propuesta es útil para presentar no sólo este concepto sino toda la termodinámica.

**Marco Antonio Martínez** (1998, pp. 397-401)

Martínez da a conocer en este trabajo el promedio de los resultados obtenidos por sus alumnos en la aplicación del cuestionario Moreira-Axt, al inicio del curso de termodinámica, por 11 veces consecutivas. Los resultados por debajo de la calificación aprobatoria han hecho que Martínez proponga que para la enseñanza de la termodinámica se tomen en cuenta las ideas previas. En sus palabras:

“Identificar los preconceptos es una de las tareas fundamentales para que el aprendizaje pueda plantearse de una manera significativa. El cuestionario Moreira-Axt permite al profesor de termodinámica darse cuenta de la existencia de los preconceptos en los alumnos en la temperatura, energía interna, calor y trabajo, aunque sin identificarlos con precisión. Pero una vez detectados, el profesor podrá modular el énfasis teórico y/o experimental a dar sobre las concepciones modernas de

tales conceptos, tal y como se los acepta hoy por la comunidad de científico. Un recurso útil para que el estudiante logre aprender la concepción científica del calor, consiste en ponerlo en situaciones en que tenga que confrontar sus conceptos sustancialistas con la visión moderna...”

Martínez refiere que al aplicar nuevamente al final del curso el mismo cuestionario el nuevo porcentaje aumenta del 54% al 73%, hecho que señala puede ser explicado “si se toma en cuenta que después de la aplicación inicial del cuestionario, parte de las actividades del curso se orientan explícitamente a que el alumno tome conciencia de sus preconceptos y a ofrecerle aquellos otros conceptos científicos que debiera aprender.”

Finalmente afirma que el reconocimiento de los preconceptos es un factor, entre otros, esencial en la adaptación a la nueva información y por tanto, en la realización de un aprendizaje significativo

**Christian Sichau** (2000, pp. 389-398)

Sichau empieza justificando su propuesta señalando que “la termodinámica es impopular entre la mayoría de los estudiantes. Muchos estudiantes la aborrecen, especialmente por las matemáticas que involucra. Es demasiado abstracta y teórica y en apariencia muy alejada de cualquier aplicación práctica.”

Acusa a los libros de texto actuales, particularmente a los textos de Reif (1964) y de Callen (1985) de mantener a la termodinámica alejada del laboratorio y de la historia. De esta manera desarrolla un curso de termodinámica basado en la realización de experimentos y en la revisión paralela del contexto histórico que rodearon a los científicos en la época de sus descubrimientos. En sus palabras:

“creo que esta separación entre la física fundamental y la física experimental o física aplicada debe ser superada. Yo deseo diseñar un curso integrado en el cual ambos -teoría y experimento- sean enseñados en un solo curso. Y en el que diferentes aspectos de la teoría estén motivados y explicados por experimentos”

Para ello escoge realizar y analizar tres experimentos: 1) los experimentos de radiación hechos por el conde Rumford y por Leslie, mismos que utiliza para contrastar sus puntos de vista con relación al calor. Rumford sostenía el punto de vista del calor como movimiento de partículas mientras que Leslie se adhería a la teoría del calórico; 2) sigue con los experimentos de Joule para discutir el descubrimiento de la conservación de la energía y finalmente, 3) realiza los experimentos de Joule-Thomson.

Como éxito señala que los alumnos se muestran interesados a lo largo del curso y afirma que los alumnos asumen como un reto conseguir y reproducir los resultados de los científicos famosos. Esta práctica y la historia paralela los hace apreciar el pasado. Como obstáculos y problemas encontrados en su experiencia hace notar que desarrollar el curso de esta manera “consume mucho tiempo”, por lo que ha ajustado el involucramiento de los alumnos a sólo un experimento. Otra dificultad, es la actitud de los alumnos que prefieren “un curso teórico-clásico al estilo de los textos tradicionales”. En el resumen señala que un curso como el que propone ofrece una variedad de posibilidades que puede enriquecer la materia de termodinámica.

### **Comentarios**

Con relación a los ejemplos de las experiencias llevadas a cabo por los profesores citados, resulta interesante destacar que, con el propósito de mejorar el aprendizaje de la termodinámica, se planteen acercamientos diferentes.

Fuchs (1987) recupera varias propuestas y elabora una propia con la que reconstruye el concepto de entropía a través del concepto de calórico y calor. El conocimiento de las ideas previas o preconcepciones por parte del profesor y de los alumnos lo resalta Martínez (1998) para el logro de un aprendizaje significativo, mientras que, la realización de experimentos y la historia juegan un papel determinante en la propuesta de Sichau (2000). Los autores mencionados destacan alguno de los tantos factores que influyen en la enseñanza de la termodinámica. Cada uno es importante en los diferentes contextos de la enseñanza y no deben ser desestimados, por lo que serán aspectos a considerar en los elementos que se presentan adelante para estructurar otra manera de enseñar la entropía.

Complementamos estos ejemplos con la propuesta de enseñanza de Mortimer (1995) que se expone más adelante y que, aunada a las anteriores, permiten evidenciar la diversidad y vigencia de la problemática existente en campo de la enseñanza de la entropía. En particular, la propuesta de Mortimer interesa exponerla aquí, porque posee elementos que toman en cuenta las ideas que hemos planteado en este capítulo, como las que se refieren al reconocimiento de las representaciones múltiples en los sujetos, y a la necesidad de su explicitación y análisis y, porque toma como base el Perfil Epistemológico de Bachelard (1968).

Efectivamente, desde la noción de Bachelard (1968)<sup>59</sup>, el perfil epistemológico para la entropía, ubica a los profesores de termodinámica, pero particularmente a los profesores de nuestra muestra, en el nivel racional, y suscritos, de acuerdo a sus representaciones dominantes, a una actitud operacional o teórica (Tarsitani y Vicentini, 1996).

Para el concepto de nuestro interés, esta postura es transmitida a los alumnos a través: de los libros de apoyo que el profesor elija como fuente de estudio de la termodinámica, de la definición de la entropía (o ausencia de ella) a la que se suscriba el profesor; de la(s) representación(es) física(s) para el concepto que el profesor sustente para la entropía, y de la presentación, aplicación y evaluación de la entropía que se implemente en el aula.

En este punto cabría preguntarse ¿qué postura transmiten a sus alumnos los profesores entrevistados? Principalmente la fenomenológica de Planck, a través del Zemansky, y en menor medida, la de Maxwell, cuando Callen es el libro de texto. Con relación a la acción en el aula, en nuestra muestra predomina la presentación expositiva por parte del profesor (Figuras del Capítulo 4) y aparece explícitamente la intención de búsqueda de comprensión del concepto de entropía y la intención del logro de una enseñanza efectiva. Para ello (Figura 5.1), algunos profesores, desde el marco de una enseñanza expositiva, eligen diferentes estrategias complementarias a la presentación histórica (pregunta 5 de la Guía), como: dejar trabajos extraclase (profesor 11); promover la discusión colectiva de lecturas de ciencia ficción (profesor 2); la realización de ensayos (profesores 9 y 11); planear y discutir situaciones absurdas o imposibles (profesor 1).

---

<sup>59</sup> Se alude a los niveles o zonas (realista, empírico y racional) que menciona Bachelard para el perfil epistemológico.

Pregunta 5: Explique brevemente, ¿cómo introduce y desarrolla el concepto de entropía en sus clases?	Pregunta 7: ¿Qué debe evidenciar el alumno para que Ud. considere que comprendió el concepto?
1. Planteamiento de situaciones absurdas	Uso y utilidad del concepto.
2. Lecturas de Ciencia Ficción. Desarrollo histórico (Carnot, Clausius).	Valore las condiciones de los problemas, uso de las fórmulas y que las aplique en la resolución de problemas.
3. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Significado de los valores numéricos para cada concepto que identifique y maneje adecuadamente las ecuaciones y sus dimensiones.
4. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Resuelva problemas conceptuales, experimentos mentales, aplicaciones numéricas, evalúe los límites numéricos que tienen las propiedades.
5. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Manejo adecuado de los conceptos y capacidad para la realización de aplicaciones aproximadas o estimativas.
6. Presenta la entropía a partir de Boltzmann. Separa la Termodinámica Clásica de la estadística. Introduce para la S el concepto de aleatoriedad.	La aplicación adecuada en situaciones problemáticas que manifieste la comprensión de los conceptos.
7. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Uso del concepto y resolución de problemas prácticos.
8. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Capacidad para plantear implicaciones de la entropía. Entender que pasa con la entropía en procesos reversibles e irreversibles calculando la entropía al final de los procesos. Calcular el límite de la entropía en sistemas cerrados.
9. Presenta la entropía según el libro de texto de Callen. Resalta el punto de vista energético, las fuerzas conservativas y no conservativas.	En la estabilidad termodinámica se manifiesta la comprensión de S,T,Q... Es importante tanto la comprensión conceptual como su aplicación. Deja problemas, trabajos como tareas y evalúa semanalmente.
10. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius. Plantea además preguntas para discusión y análisis como: ¿Qué ocurre con las variables cuando una permanece constante?	Distinción entre procesos reversibles e irreversibles y una aplicación correcta de los conceptos.
11. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius. Utiliza la analogía hidráulica, lecturas, solicita realización de ensayos. Enfatiza para la termodinámica el carácter de ciencia en construcción.	Realiza preguntas sobre fundamentos y aplicaciones de y en ese campo.
12. A partir del seguimiento del desarrollo histórico. Carnot, Clausius	Resolución de problemas. Aplicación correcta de los conceptos. Preguntas directas sobre conceptos. El profesor afirma estar conciente de que la comprensión requiere un tiempo que puede exceder al del curso.

**FIGURA 5.1 Algunos elementos de enseñanza y evaluación de la entropía en los profesores de la muestra**

Estas estrategias didácticas pueden ser abarcadas en su totalidad por un mismo profesor (profesor 9 y el profesor 1 que imparte clases en el nivel de maestría destacándose que en ambos profesores, el libro de Callen es el texto) o puede elegirse una presentación que esté situada en el planteamiento histórico, sin ir más allá (profesores 3,4, 5,7, 8, 12).

Por otro lado, se subraya la correspondencia de las presentaciones didácticas apuntadas por los profesores entrevistados, con los niveles realista, empírico y racional del perfil epistemológico de Bachelard (1968). El primer nivel aparece, a través del señalamiento y discusión de situaciones cotidianas imposibles; el nivel empírico se muestra, a través del planteamiento histórico iniciado con Carnot y el nivel racional, a través de la deducción y uso de la expresión matemática para la entropía. Asimismo, se manifiesta en las respuestas de los profesores la necesidad didáctica de ir presentando el concepto de entropía a partir del recorrido por niveles de menor dificultad, -situaciones cotidianas ligadas a la segunda ley de la

termodinámica- a mayor dificultad, -deducción, comprensión y aplicación de la expresión matemática de Clausius-.

Como complemento informativo para la estructuración de elementos para una enseñanza alternativa para la entropía, se expondrá a continuación la propuesta de enseñanza de Mortimer (1995)

### 5.3.2 Perfil Conceptual de Mortimer (PCM)

Mortimer, en 1995, elabora una propuesta que llama Perfil Conceptual (PCM, Perfil Conceptual de Mortimer)<sup>60</sup>, como una derivación del perfil epistemológico de Bachelard (1968), que tiene como propósito el encontrar un *modelo para describir los cambios en los pensamientos individuales como resultado del proceso de enseñanza*. Considera que a partir del perfil conceptual se desprende *un modelo de aprendizaje y una nueva manera de enseñar la ciencia* (las cursivas son nuestras). En sus palabras:

Tomando la noción del Perfil Conceptual en cuenta, el problema de aprendizaje y enseñanza de la ciencia puede ser considerado en una nueva manera. Es posible enseñar un concepto a un cierto nivel del perfil sin referencia a un nivel menos complejo ya que son epistemológica y ontológicamente diferentes. En este sentido el proceso de aprendizaje puede ser pensado como la construcción de un cuerpo de nociones basado sobre nuevos hechos y experimentos presentados a los estudiantes en el proceso de enseñanza.

El nuevo concepto no necesariamente depende de los previos y pueden ser aplicados a un dominio nuevo y diferente. Sólo cuando los conceptos alternativos forman un obstáculo epistemológico u ontológico al desarrollo del concepto en un nivel más complejo, es necesario tratar con esta contradicción, algo que puede ocurrir en cualquier momento durante el proceso de enseñanza y no sólo al principio. Superar esta contradicción significa encontrar una manera de explicarla, lo cual es posible en el nivel más complejo al que se enseñe el concepto, pero no significa abandonar la antigua manera de verlo, la cual continuará formando parte del perfil individual. (pp. 273,274)

---

<sup>60</sup> En lo sucesivo, denotaremos el Perfil Conceptual de Mortimer como PCM. Mortimer (1995) utiliza el término de Perfil Conceptual para distinguirlo del Perfil Epistemológico de Bachelard (1968), al que toma como base, pero añade la dimensión ontológica a la epistemológica en cada nivel (zona) del perfil, así como una dimensión cultural que introduce los compromisos epistemológicos y ontológicos de los individuos.

Aunque Mortimer declara de manera explícita el alejamiento de su modelo con respecto a la secuencia de actividades para la enseñanza y el aprendizaje que “sugieren algunas aproximaciones constructivistas”, consideramos que es necesario revisar los elementos principales del constructivismo con objeto de explorar si se dan estos alejamientos, y para evaluarlo como una alternativa de enseñanza para la entropía.

En el Capítulo 1, se planteó la línea constructivista como parte del marco teórico que sustentaría nuestro trabajo. De manera explícita la Figura 1.9 destaca los elementos distintivos del constructivismo radical de acuerdo a Von Glasersfeld (1989) quien lo postula y con el que este trabajo tiene coincidencias El constructivismo, en el Siglo XX nace, ya se ha dicho, como una corriente epistemológica asociada a la educación de la ciencia. Como epistemología, el constructivismo puede ser mejor comprendido a partir del esclarecimiento que realiza Ernest (1995) de la epistemología. (Figura 5.2)

La epistemología tiene dos contextos principales de uso: el psicológico y el filosófico. En el contexto psicológico la epistemología se enfoca hacia las teorías del conocimiento y desarrollo del conocimiento, hacia las estructuras del conocimiento construido por los individuos, hacia las condiciones generales del aprendizaje y hacia la naturaleza, estructura y desarrollo del conocimiento convencional (conocimiento público) y su relación con el aprendiz y su aprendizaje.

En el contexto filosófico la epistemología se enfoca hacia las categorías lógicas del conocimiento y su base justificatoria. También se orienta hacia la garantía del conocimiento subjetivo de un solo individuo, hacia las garantías del conocimiento convencional y hacia el conocer la verdad o falsedad de las sentencias declarativas.

<b>CONTEXTO PSICOLÓGICO</b>	<b>CONTEXTO FILOSÓFICO</b>
<p>La epistemología en este contexto, se ocupa de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las Teorías de crecimiento y desarrollo del conocimiento.</li> <li>▪ Las Teorías de conocimiento construidas por los individuos.</li> <li>▪ Las Teorías de las condiciones generales de aprendizaje.</li> <li>▪ La naturaleza, estructura y desarrollo del conocimiento convencional (conocimiento público) y su relación con el sujeto cognoscente.</li> <li>▪ La naturaleza, estructura y desarrollo del conocimiento convencional y su relación con el aprendizaje del sujeto que aprende.</li> <li>▪ La génesis y naturaleza del conocimiento, incluyendo el aprendizaje.</li> </ul>	<p>La epistemología en este contexto se ocupa de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Las categorías lógicas del conocimiento.</li> <li>▪ De la clasificación lógica y justificación del conocimiento (en lo que Popper llama Contexto de Justificación).</li> <li>▪ Las garantías del conocimiento subjetivo de un solo individuo.</li> <li>▪ Las garantías del conocimiento convencional.</li> <li>▪ De la verdad o falsedad de las declaraciones.</li> </ul>

Fuente: Paul Ernest (1995)

**FIGURA 5.2 Contextos de la Epistemología**

Lo anterior, referido a la epistemología en lo general puede ser particularizado al constructivismo por lo que resulta consecuente el que las teorías de cambio conceptual, por ejemplo, se planteen desde una aproximación cognitiva (contexto psicológico) y una epistemológica (contexto filosófico). Flores (2004).

Si bien ambos contextos originan teorías constructivistas de aprendizaje, éstas teorías no necesariamente concluyen con propuestas o teorías constructivistas de enseñanza, amparadas bajo el supuesto de que el proceso de esclarecimiento y construcción de nuevas ideas tiene lugar internamente dentro de la cabeza del que aprende, situación que ocurre cuando un aprendizaje es independiente de la forma de instrucción (Millar, 1989). Se remite al lector a la Figura 1.10 del Capítulo 1, donde se muestran los paradigmas educacionales y sus metáforas, realizado por Ernest (1993).

En términos generales, las aproximaciones de enseñanza de corte constructivista comparten y sugieren la siguiente secuencia de actividades para ser realizadas por los profesores:

1. Identificar las ideas previas y puntos de vista de los estudiantes.
2. Crear oportunidades para que los estudiantes exploren sus ideas previas y prueben su robustez en la explicación de los fenómenos, dando cuenta de eventos y haciendo predicciones.
3. Proporcionar estímulos para que los estudiantes desarrollen, modifiquen y, donde sea necesario, cambien sus ideas y puntos de vista.
4. Apoyar los intentos de los estudiantes en su reflexión y reconstrucción de sus ideas y puntos de vista.

Tomando estos cuatro puntos como características básicas (no únicas) de una enseñanza constructivista, se está en condiciones de compararlos con los puntos para la enseñanza del Modelo de Mortimer (1995) para confirmar su alejamiento y su ubicación con respecto al constructivismo.

### 5.3.2.1 Características del PCM

La propuesta del PCM (1995), se presenta también como un modelo para analizar la evolución conceptual en el salón de clase. Creemos que efectivamente, el modelo difiere de los modelos de cambio conceptual clásicos, al sugerir que es posible usar diferentes maneras de pensar en diferentes dominios y que esas diferentes maneras de pensar conducen a representaciones o concepciones alternativas también distintas, que coexisten en el mismo individuo, accedando a una u otra en el contexto apropiado.

Para Mortimer (1995), el proceso de aprendizaje y enseñanza de acuerdo al modelo del perfil conceptual, consta de dos momentos:

1. la construcción-adquisición del concepto a un nivel específico y
2. alcanzar la conciencia del perfil epistemológico propio

En el modelo del perfil conceptual, (PCM) el papel del profesor en ambos momentos es fundamental.

En el primer momento, el profesor señalará al alumno la evidencia (el contenido programático) en ese nivel, mostrará las relaciones entre teoría y experimento, identificará los obstáculos y ayudará a su superación, conducirá la tarea de reconocer las barreras que se interponen entre las nociones previas del alumno y las nuevas, y dará al estudiante oportunidades para comparar estas ideas con las ideas científicas.

En el segundo momento el profesor propiciará la comparación de las zonas o niveles del perfil del estudiante así como la evaluación de su potencia relativa. En este proceso el estudiante será consciente de las limitaciones de sus concepciones alternativas (representaciones) pero sin tener que abandonar ninguna.

De esta manera, para que el alumno adquiriera conciencia de un concepto, el profesor no sólo deberá plantear su uso en situaciones nuevas y problemáticas sino también demandar una conciencia de uso para, según señala Mortimer (1995), contrarrestar

... la fuerte tendencia en el estudiante de utilizar las concepciones previas que pertenecen al nivel no científico de su perfil conceptual. Esto ocurre debido a que las concepciones previas le son más familiares y generalmente es más fácil relacionar algo nuevo con una estructura conceptual ya familiar que relacionarlo con una nueva estructura recién construida.

Para que el nuevo concepto adquiera estabilidad deberá ser utilizado en un amplio rango de situaciones problemáticas. Durante este proceso el estudiante adquirirá conciencia no sólo del nuevo concepto científico sino también de las relaciones entre los diferentes niveles de su perfil conceptual y de cuando es más conveniente usar uno u otro de los niveles.(p. 275)

El proceso de enseñanza que propone Mortimer incluye entonces el conocimiento y el uso explícito de las ideas alternativas, su crítica y la evaluación de su dominio. Pero, y esta es una característica importante, ese proceso de enseñanza no incluye la supresión de esas ideas alternativas (representaciones) ni eleva o disminuye el estatus de esas ideas sometiéndolas al cumplimiento de las condiciones de Strike y Posner (1985) de ser inteligibles, plausibles y fructíferas. De acuerdo al perfil conceptual no se puede aumentar o disminuir la plausibilidad o la fructificidad de alguna concepción sino sólo mostrar en que dominio puede ser considerada esa concepción plausible y fructífera.

La propuesta del Perfil Conceptual de Mortimer entraña una nueva forma de interpretar las concepciones de los sujetos a partir del reconocimiento básico de la propia existencia del perfil en los individuos, y del utilizar las categorías ontológicas de Chi (1992) en correspondencia con los niveles epistemológicos de Bachelard<sup>61</sup>, cómo categorías para la profundización y la aclaración complementaria.

El reconocimiento de que para un mismo concepto coexisten en el individuo varias representaciones epistemológica y ontológicamente diferentes, hace que la noción de Perfil como se planteó en el marco teórico expresado en el Capítulo1, surja como la apropiada para dar cuenta en este trabajo, por un lado, de la gama de representaciones identificadas para la entropía en la muestra de los profesores entrevistados y por otro lado, que sea considerado como un elemento dentro de la elaboración de una propuesta viable para el aprendizaje, la enseñanza y la explicación del desarrollo histórico de un concepto complejo como es el de la entropía.

---

<sup>61</sup>Las categorías ontológicas de Chi son las de materia, eventos y abstracciones. Los niveles de Bachelard son: realista, empírico y racional

Importa aquí señalar que el alejamiento del modelo de Mortimer con la visión del cambio conceptual, se matiza cuando notamos que un punto en común para el aprendizaje y la enseñanza en las teorías de cambio conceptual y en la del PCM, está relacionado con la suposición de la existencia y la explicitación de las preconcepciones en los estudiantes.

Por otro lado, el modelo de Mortimer se ubica en el constructivismo si se entiende al constructivismo como una postura epistemológica, una actitud y una forma de *ver como*.

Para los modelos mencionados, de cambio conceptual y el de Mortimer, las preconcepciones y las representaciones de los alumnos deben ser identificadas. Las preconcepciones, para ser modificadas por los modelos de cambio conceptual y las representaciones, para ser reveladas, explicitadas y analizadas a partir del PCM.

En suma, el modelo de Mortimer (1995) es propuesto como una nueva manera de aprendizaje y enseñanza en la que la enseñanza debe mostrar los alcances de la(s) representación(es) conceptual(es) de los sujetos.

### 5.3.2.2 *Un Ejemplo de Aplicación del PCM*

Se revisará el modelo de Mortimer aplicado al aprendizaje de la entropía, a partir del trabajo de Ribeiro y Mortimer (2004). En ese trabajo se propone un perfil conceptual para “la segunda Ley de la Termodinámica aplicada a las transformaciones fisicoquímicas, centrado en los conceptos de entropía y espontaneidad”

Por convenir a nuestro interés destacamos del trabajo de Ribeiro y Mortimer los siguientes aspectos referidos principalmente al Perfil conceptual en un contexto de aula con estudiantes del segundo año del nivel medio superior (16-17 años) a quienes se planteó la pregunta ¿en qué condiciones una reacción química puede o no ocurrir? con la intención por parte de los autores, de que se consideraran las consecuencias de la 2ª Ley de la Termodinámica para el estudio de las transformaciones fisicoquímicas, y para la comprensión de los conceptos de entropía, espontaneidad y energía libre con las que se puede abordar científicamente las condiciones en las que esas transformaciones pueden o no ocurrir.

El concepto de espontaneidad, importa resaltarlo, los autores lo introducen al considerar que esa idea puede funcionar como un eslabón entre las concepciones cotidianas que los alumnos tienen sobre la ocurrencia de transformaciones y los conceptos más formalizados de entropía y energía libre. Con relación al primer momento, de comprensión del concepto:

Se propusieron tres niveles de comprensión... para cada nivel se constituyó por lo menos una zona de perfil conceptual como sigue: nivel perceptivo/intuitivo (zona perceptivo/intuitiva); nivel empírico (zona empírica) y nivel teórico (zona formalista y zona racionalista).

En la zona perceptivo/intuitiva están comprendidas las ideas de espontaneidad que corresponden a las impresiones inmediatas, a las sensaciones e intenciones...

Del contexto histórico se consideraron las concepciones de materia y sus transformaciones:

En la zona empírica se consideraron las ideas que surgen a partir de la discusión de experimentos o fenómenos en la que se resaltan las condiciones necesarias para que un proceso ocurra espontáneamente. Estas condiciones serían físicas (temperatura, presión, etc.) y aquellas establecidas por la expresión de variación de entropía del universo, que considera un proceso espontáneo cuando  $\Delta S > 0$  (variación de la entropía mayor que cero). El uso de esta expresión fue considerado como característico de la zona empírica porque, en una primera aproximación los estudiantes tienden a considerar los valores de la variación de la entropía como una medida del aumento o disminución del desorden.

La zona formalista se caracteriza por el uso de algoritmos y fórmulas matemáticas para el análisis de los procesos, sin implicar un completo entendimiento de las relaciones conceptuales involucradas. Los alumnos utilizan la expresión de energía libre –una noción más compleja que relaciona entropía, entalpía y temperatura- pero no presentan una comprensión clara de lo que esta energía representa. La dirección para que ocurra espontáneamente un proceso está determinada por la disminución de la energía libre y, en términos del formalismo matemático, está representada por el signo negativo para la variación de la energía libre,  $\Delta G < 0$ ...

La zona racionalista del Perfil comprende las ideas acerca de la espontaneidad de los procesos que implican una distribución de energía en un nivel atómico –molecular- y una mayor aleatoriedad espacial. A pesar de haber un predominio en el uso del formalismo matemático, consideramos que hay una racionalización de las ideas cuando los alumnos piensan en la espontaneidad de los procesos a partir de los modelos de distribución de energía molecular, y también cuando hubo una comprensión de la entropía dentro de una noción más compleja expresada por la energía libre.

(Ribeiro & Mortimer, 2004, pp. 222,223)

Con relación a las actividades de enseñanza, se reporta una secuencia de actividades en el aula que refleja las intenciones del profesor consistentes en: generar un problema; explorar la

visión de los estudiantes, introducir y desarrollar una historia científica<sup>62</sup>; guiar a los estudiantes en el trabajo con las ideas científicas y dar apoyo al proceso de internalización; guiar a los estudiantes en la aplicación de las ideas científicas y en la expansión de su uso, transfiriéndoles progresivamente su control y responsabilidad; desarrollar una narración de apoyo a una historia científica.<sup>63</sup>

Esta secuencia expresa en otras palabras, las actividades que son realizadas comúnmente por los profesores de ciencia en una enseñanza tradicional, a saber: introducción al tema, sondeo de lo que los estudiantes ya conocen sobre el tema a tratar, con esa base, ampliación de la explicación del profesor; planteamiento de situaciones de aplicación y de evaluación. Las diferencias surgen en la transferencia de la responsabilidad al alumno y en el papel del profesor en este modelo.

#### Papel del profesor

Los autores subrayan el papel del profesor como guía y la necesidad de dar oportunidad a los estudiantes de hablar y pensar con las nuevas ideas científicas en pequeños grupos mediante actividades con toda la clase y, al mismo tiempo, dar apoyo a los estudiantes para producir significados individuales internalizando esas ideas y realizar hacia ellos la transferencia del control y la responsabilidad por el uso de las ideas.

Importa subrayar que los autores encuentran que es del libro de texto, y no del discurso del profesor, de donde surgen las ideas características de las zonas empírica y racionalista del perfil conceptual y que, a su vez, la zona formalista emerge cuando del texto y con la intervención del profesor, se introduce la expresión matemática para el concepto de entropía. A partir de ello, detectan que el formalismo matemático pasa a predominar en las discusiones y es incorporado por los alumnos a su discurso.

Por otro lado, Ribeiro y Mortimer (2004) encuentran que la zona empírica parece representar una zona de articulación entre los niveles perceptivo/intuitivo y el teórico, apuntando que fueron observadas transiciones de la zona perceptiva/intuitiva hacia la zona empírica y de la

<sup>62</sup> Entendida por los autores como “la disposición de las ideas científicas (incluyendo temas conceptuales, epistemológicos, tecnológicos y ambientales), en el plano social del aula”. Ribeiro y Mortimer (2004, p. 63).

<sup>63</sup> Se refiere a “comentar el desarrollo de una historia científica a fin de ayudar a los estudiantes a seguir su evaluación y a entender sus relaciones con el currículo de ciencias como un todo” (p. 63).

zona empírica a las zonas racionalista y formalista del perfil, apareciendo como “momentos” en la discusión y reflexión de las ideas científicas vinculadas fuertemente al papel articulador del profesor. Las transiciones entre las zonas del perfil ocurrieron cuando el profesor describió los procesos espontáneos considerando tanto las ideas informales de los alumnos como las explicaciones y generalizaciones presentadas desde el punto de vista científico.

En resumen, los autores consideran que en cada intención didáctica, las actividades del profesor van delimitando los niveles epistemológicos. Así, se destaca que el nivel y la zona perceptivo-intuitiva sólo aparecen cuando la intención del profesor es la exploración de las ideas previas de los alumnos. La zona/nivel es empírica, cuando la intención del profesor es generar un problema, verificar las ideas de los alumnos y desarrollar y aplicar la visión científica.

Por otro lado el nivel es teórico, y las zonas del perfil son la formalista y la racionalista, cuando la intención del profesor es la de aplicar las ideas científicas (formalista) y/o la de desarrollar la visión científica del concepto (racionalista).

Aunque los autores aclaran que las relaciones encontradas son sólo para las clases investigadas al estudiar los conceptos de entropía y espontaneidad, y que no pueden ser tomadas como relaciones generales entre los aspectos epistemológicos y discursivos presentes en cualquier aula, no se pueden ignorar los puntos que presentan en común con la secuencia de actividades que todo profesor de ciencias realiza en su aula.

## **5.4 Elementos para Estructurar una Propuesta para la Enseñanza de la Entropía**

### 5.4.1 Referentes Teóricos

Las experiencias de los profesores que hemos reseñado han destacado los siguientes aspectos que cada uno consideró importante en la enseñanza de la entropía:

- el calórico y cantidades que se asemejan a sustancias (substancelike), Fucks (1987)
- las ideas previas (Martínez, 1998)
- la historia y la experimentación (Sichau, 2000)

- las representaciones múltiples de los conceptos (Mortimer, 1995, 2004)

En todas ellas el profesor aparece como promotor y guía del aprendizaje y la participación del alumno es promovida y alentada lo cual permite ubicarlas cercanas al constructivismo.

Resaltamos que en estas experiencias los profesores desarrollan su enseñanza dentro de la termodinámica clásica pero Mortimer (1995) además, como un caso aparte, presenta un modelo que resulta relevante para la estructuración que presentamos porque introduce de manera explícita los aspectos epistemológicos de Bachelard (1993), mismos que posibilitarán la conexión de las dos vertientes de este trabajo: la histórica como se ha reiterado, orientada hacia la revisión e interpretación de la evolución de la entropía con base en nociones provenientes de la nueva filosofía, y la segunda, educativa, enfocada a identificar los elementos específicos con los que los profesores caracterizan la entropía y su enseñanza en una práctica actual, real y vigente.

En este punto de síntesis de un trabajo que por su objeto de estudio se ubica necesariamente en un campo multidisciplinario, resulta indispensable distinguir con claridad, los senderos transitados y sus lugares de encuentro. Para ello, planteamos las ideas de Bachelard (1993, edición en castellano) como lugar de convergencia de las líneas temáticas que hemos tocado a lo largo de este trabajo, a saber:

1. una línea disciplinaria
2. una línea epistemológica
3. una línea histórica
4. una línea pedagógico-didáctica
5. una línea cognitiva

Hacemos evidente que para este estudio, las líneas 2,3 y 4 se particularizan y tienen sentido sólo en la medida en que están referidas a la línea 1, a la línea disciplinaria, que se corresponde en este caso con la termodinámica y más específicamente con la entropía. La línea 5 se hace presente en la atención a los sujetos, a sus conocimientos y a su crecimiento cognitivo.

En el trabajo de Kuhn (1975), que ha sido un referente importante para esta investigación, se encuentran las líneas disciplinaria, epistemológica y la histórica y, por su lado, en Bachelard (1993) confluyen todas las líneas a partir de su perfil epistemológico pues con esa noción se involucra: al contenido disciplinario; a la historia en el seguimiento de los conceptos en su devenir complejo; a la epistemología dado el propio carácter epistemológico del perfil; a lo psicológico-cognitivo al plantear el perfil en el individuo; y a la didáctica si se utiliza el perfil como instrumento de enseñanza, indagación y evaluación.

Estableceremos enseguida, las aproximaciones de estos autores con nuestro trabajo y con la propuesta de lineamientos para la enseñanza de la entropía.

El recorrido histórico para la entropía se ha interpretado siguiendo a Kuhn (1975), principalmente a través de su concepción de paradigma y sus etapas de desarrollo y, aunque nuestras nociones analíticas de *significación disciplinaria y perceptual* se derivan de él y otros se sabe, por el propio Kuhn (1975, p. 24), que su interés fundamental recayó en pensar el cambio en las disciplinas globalmente “ en trazar una nueva imagen de la ciencia” y no en el pensar particular de la evolución de los conceptos, como hemos aquí realizado con el concepto de entropía.

Por su lado, Bachelard (1993), desde una perspectiva filosófica-histórica-psicológica, se interesa por el desarrollo de los conceptos científicos en su obra la “Filosofía del no”, publicada en 1940. Debe aclararse sin embargo, que su enfoque se orienta de manera primaria hacia la evolución epistemológica la que, afirma, surge como consecuencia de “la evolución de un conocimiento particular en la dirección de una coherencia racional” (Bachelard, 1993 p.20). Al respecto señala:

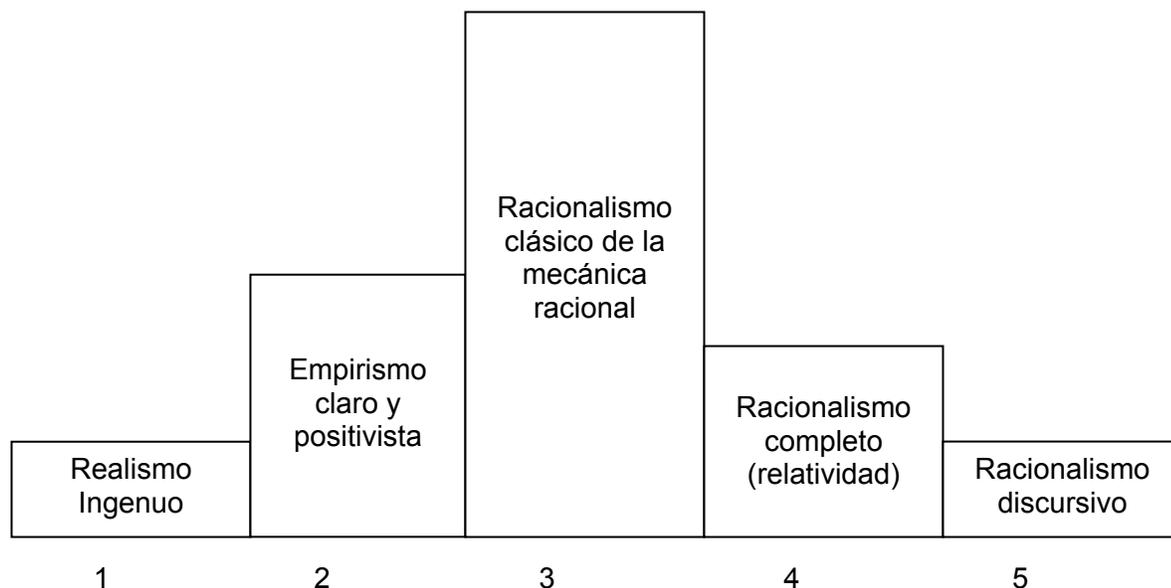
... tomaremos el sentido del progreso científico como eje de nuestro estudio filosófico, y si siguiendo la abscisa de su desenvolvimiento, los sistemas filosóficos se sitúan regularmente en un orden constante para todas las nociones, orden que va del animismo al superracionalismo, pasando por el realismo, el positivismo y el racionalismo simple, tendremos algún derecho a hablar de un progreso filosófico de las nociones científicas (...) el sentido de la evolución filosófica de las nociones científicas es tan nítido que es menester inferir que el conocimiento científico ordena el pensamiento, que la ciencia ordena la filosofía misma. El pensamiento científico provee, pues, un

principio para la clasificación de las filosofías y para el estudio del progreso de la razón. Bachelard (1993, p.21)

Es preciso hacer notar que Bachelard parte del supuesto de un progreso científico, que se hace evidente en el devenir de los conceptos de la ciencia, hacia el nivel racionalista. En su noción de Perfil Epistemológico Bachelard usa su argumentación para demostrar la necesidad de una “filosofía dispersada” para la interpretación y explicación epistemológica de los conceptos científicos. La concepción de un progreso de la ciencia hacia niveles de complejidad creciente que epistemológicamente corresponde en su punto más alto al nivel racional, ha sido observada en este estudio en la evolución de la entropía.

Bachelard, considera como un hecho la existencia de un perfil epistemológico no sólo en los conceptos sino también en los individuos: (Figura 5.4)

Insistimos en el hecho de que un perfil epistemológico debe ser relativo a un concepto designado, que vale sólo para un espíritu particular que se examina a sí mismo en un estadio particular de su cultura. Esta doble particularización constituye su interés para una psicología del espíritu científico. Bachelard, (1993, p. 37)



Fuente: Bachelard, G (1993, p.38)

**Figura 5.4 Perfil Epistemológico de Bachelard para el Concepto de Masa**

Contrastemos, las nociones de ambos autores, Kuhn y Bachelard, y señalemos su uso en este trabajo para hacerlas converger en una selección de elementos que posibiliten la estructuración de una propuesta de enseñanza para la entropía.

Bachelard en 1940, contempla el progreso científico como un devenir de la ciencia y sus conceptos hacia niveles de complejidad creciente. La noción de complejidad remite al contenido disciplinario, en el que los niveles de complejidad pueden ser independientes.

A su vez Kuhn, en 1962, veinte años después, contempla el progreso científico como un devenir de los paradigmas disciplinarios hacia su maduración. La noción de insuficiencia explicativa remite al cambio de paradigma y al inicio de un nuevo ciclo. Si bien el nuevo paradigma es inconmensurable con el que le precede, cada paradigma o dominio disciplinario, continúa persistiendo en la historia de la ciencia en el tiempo, contexto y demarcación que le es propio.

En nuestro trabajo consideramos que las ideas de Bachelard y Kuhn son complementarias. No son ni contradictorias ni excluyentes. De hecho, proporcionan un buen ejemplo de *percepción significada*. Son dos explicaciones al cambio en la ciencia desde propósitos, perspectivas y cargas teóricas diferentes.

El perfil epistemológico de Bachelard relativo a los conceptos, da cuenta del nivel epistemológico (realista, empírico y racional) en el que cada concepto se encuentra en su devenir complejo, y puede dar cuenta del máximo nivel de complejidad alcanzado dentro de la trama disciplinaria en la que aparece.

Por su lado, la noción de perfil epistemológico en el individuo (espíritu científico), da cuenta gráficamente, en un plano cartesiano, sin detalle o precisión, del resultado de un ejercicio de reflexión, de auto examen, respecto a un concepto en particular. En el eje de las ordenadas, dice Bachelard “si pudiera ser exacto, estaría el valor que mediría la frecuencia del uso efectivo de la noción, del uso cultural o conocimiento que el individuo tiene de un concepto y, en el eje de las abscisas las filosofías sucesivas relacionadas al concepto” ( Bachelard 1993, p.37).

Con ello, Bachelard introduce al sujeto y posibilita asociar la dimensión psicológico-cognitiva con sus planteamientos.

A su vez, el sujeto aparece en Kuhn como parte de una comunidad que comparte “sus modos inconmensurables de ver el mundo” (Kuhn 1975, p. 25) y que se reconoce como miembro de un paradigma porque comparte toda una constelación de creencias, valores y técnicas que asume toda la comunidad, tal que condiciona la forma de percibir y de dar soluciones a los problemas dentro de ese paradigma.

Las nociones de *significación disciplinaria y perceptual* utilizadas en este trabajo, tienen aquí su origen. Con ellas se destaca una visión individual pero cargada teóricamente de las creencias comunitarias. Esta afirmación refuerza la complementariedad que señalamos arriba entre las ideas de Bachelard y Kuhn.

#### 5.4.2 Vertientes Histórica y Educativa

Los aspectos investigados en las vertientes que constituyen este trabajo, conduce al tránsito de un concepto disciplinario particular, (Vertiente Histórica), a su construcción-apropiación, y enseñanza (Vertiente Educativa). Este tránsito nos remite a la reflexión de algunos aspectos teóricos relevantes

En el terreno de la enseñanza, obvio es decirlo, el profesor está colocado como mediador entre el alumno y el contenido a ser enseñado-aprendido. En ese puesto, tiene la responsabilidad de introducir al estudiante en el conocimiento de las características del paradigma o mejor aún de la matriz disciplinaria<sup>64</sup>, objeto de enseñanza, y hacerlo partícipe de los elementos de una construcción científica realizada en periodos de larga duración.

<sup>64</sup> En la posdata de su obra en 1969, Kuhn (1971, pp.272-319) propone sustituir el término paradigma por el de “matriz disciplinaria”. Se sigue a Kuhn (1971, pp. 280-290), para distinguir los componentes de la matriz disciplinaria. El primer componente se refiere a las “generalizaciones simbólicas”,  $f=ma$ , etcétera, de las que dice que, de no ser por la aceptación general de expresiones como estas, no habría puntos en que los miembros del grupo pudieran basar las técnicas de manipulación lógica y matemática en su empresa de solución de problemas

El segundo componente, lo refiere a los compromisos compartidos, a las creencias en modelos particulares. Los modelos dan al grupo sus analogías y metáforas preferidas o permisibles.

El tercer componente se refiere a los valores como la coherencia, la predicción cuantitativa o cualitativa, etcétera. Los valores permiten juzgar teorías enteras en tanto formulen y solucionen enigmas, permiten identificar una crisis.

El cuarto componente trata de los que llama “ejemplares”, que son las soluciones concretas de los problemas que los estudiantes encuentran desde el principio de su educación científica

La matriz disciplinaria de Kuhn (Posdata, 1975), presenta el contenido científico que conforma una disciplina y, por lo mismo, constituye una guía para seleccionar el contenido de la enseñanza. Este contenido, de acuerdo a Kuhn, está compuesto de A: generalizaciones lógico-simbólicas; B: creencias en modelos; C: valores compartidos; D: ejemplares o conjunto de soluciones concretas a problemas.

Estos componentes son presentados separadamente por Kuhn y no compromete explícitamente ninguna articulación entre unos y otros, de allí que Duschl & Gitomer (1991) interpreten los componentes sin conexiones entre ellos como aparece en la Figura 5.5. No obstante, es de esperarse que los contenidos de cada componente estén presentes y de alguna manera articulados en los sujetos que sustentan ese paradigma.

En nuestro trabajo, los cuatro componentes se pueden distinguir en los sujetos de la termodinámica: constructores, continuadores y difusores. Son los constructores sin embargo, los que, como fundadores de paradigma, sientan las bases del mismo en cada componente, esto es, determinan las generalizaciones lógico-simbólicas, los contenidos conceptuales, los modelos, los valores y los límites del paradigma. Los continuadores los complementan amplían y fortalecen y, los difusores, los asumen y conocen para difundirlos y enseñarlos.

Se ha dicho que el individuo en Kuhn (1971) dentro de un paradigma, es un sujeto en comunidad que comparte un conocimiento especializado y socializado con esa comunidad constituido de las creencias y las consideraciones contempladas en los componentes de la matriz disciplinaria.

A su vez, el sujeto de aprendizaje es un individuo ajeno a esa comunidad de conocimiento a la cual, como responsabilidad del profesor, debe incorporársele.

¿Qué implicaciones podemos desprender de las consideraciones destacadas a partir de los trabajos de Bachelard, Kuhn y Mortimer para nuestro trabajo de síntesis y para la enseñanza?

Al respecto, nos plantearemos una única pregunta:

¿Cómo conseguir que el conocimiento disciplinar de la termodinámica y la entropía, socializado y compartido, sea conocido y personalizado en los sujetos de aprendizaje?

Para plantear una respuesta integrada, acudiremos: a consideraciones derivadas del análisis de la evolución de la entropía obtenidos de este trabajo, a la matriz disciplinaria de Khun, a los perfiles de Bachelard y Mortimer y comentamos algunas ideas de los profesores entrevistados y de las propuestas de enseñanza reseñadas.

La pregunta requiere, pensando en Kuhn (1975), poner en relación los conocimientos de la matriz disciplinaria, (conocimiento preconstruido, externo, socialmente compartido y en posesión del profesor) y el conocimiento interno individualmente construido que se manifiesta en las ideas previas del alumno.

¿Cómo conseguir esto?

De nuestro trabajo, las nociones de *significación disciplinar* y *significación perceptual* permiten la incorporación de las definiciones y el uso de metáforas respectivamente, para la presentación y la representación conceptual. Las definiciones, nociones y representaciones que portan los alumnos como ideas previas alrededor de un concepto, con su explicitación, posibilitan el acceso a la autoexploración que requiere la elaboración de los perfiles epistemológicos de Bachelard.

Al respecto, la determinación y contrastación de los perfiles epistemológicos de los alumnos con los del profesor, proporciona los elementos para adicionar la dimensión psicológica-cognitiva individual del alumno, en el tránsito del contenido del mundo externo a su incorporación al mundo interno.

### **5.5 Propuesta de enseñanza de la entropía. Fases de la propuesta**

La parte fundamental de la propuesta de enseñanza como aquí se considera, consiste en dos fases que involucran al profesor: una de reflexión y otra de acción. La fase 1 de reflexión fuera del aula, consta de sólo una etapa que se refiere a la realización de un ejercicio analítico conducido por la que hemos denominado: “Guía de análisis didáctico” y que esencialmente establece una guía para la planeación de las actividades de clase. Por su lado, la fase de acción en el aula consta de tres etapas. En las etapas 1 y 3, de inicio y cierre, el profesor guía

a sus alumnos en el establecimiento de sus perfiles epistemológicos. En la etapa 2, intermedia, los alumnos construyen su conocimiento a partir de los componentes de la Matriz Disciplinaria de Kuhn.

### 5.5.1 Fase I. De reflexión. Guía de análisis didáctico

Esta fase contempla la realización por parte del profesor de un ejercicio reflexivo guiado por los elementos que conforman la “Guía de análisis didáctico” inspirada en la matriz disciplinaria de Kuhn (Posdata, 1975) y en los perfiles de Bachelard (1993) y Mortimer (1995).

#### Etapa 1

El análisis mediante la Guía significa la realización de los siguientes pasos: 1) determinar la ubicación de las estrategias didácticas a ser utilizadas con relación a las zonas epistemológicas de Mortimer, 2) con base en el análisis realizado en el punto 1, determinar el nivel de logro en los alumnos, 3) analizar la evolución epistemológica de los conceptos de acuerdo a Bachelard, para identificar en la trama disciplinaria el grado de complejidad de los conceptos y 4) distinguir los contenidos a impartir dentro de la matriz disciplinaria de Kuhn.

Este análisis implica para el profesor asumir además -como un quinto punto- el compromiso de reflexionar en el esclarecimiento de los perfiles epistemológicos propios en relación con los conceptos claves de la disciplina, y el de diferenciar la naturaleza epistemológica diversa de los contenidos que conforman la disciplina.

Como ejemplo del desarrollo de los puntos 1) y 2) de la Guía de Análisis Didáctico, se identifican los criterios de logro y las zonas epistemológicas de Mortimer en la enseñanza de la entropía que hacen referencia los profesores de la muestra.

Tomando como base las respuestas de los profesores entrevistados, es posible identificar de acuerdo con Mortimer (1995), las zonas epistemológicas que se desprenden de las actividades de presentación y evaluación que describen los profesores de nuestra muestra, en la enseñanza de la entropía. Asimismo, con Ribeiro y Mortimer (2004), es posible describir la vinculación que se encuentra entre las intenciones didácticas de los profesores, aunadas a las actividades que de esas intenciones se derivan.

### Vinculación de las intenciones didácticas con los niveles epistemológicos

La Figura 5.1 destaca las respuestas dadas por los profesores a las preguntas 5 y 17 de la Guía de entrevistas. Como ya se ha mencionado, 9 de los 12 profesores introducen el concepto de entropía con base en su desarrollo histórico, lo que hace suponer<sup>65</sup> que la intención de los profesores, es la de plantear el problema de la época y desarrollar la visión científica<sup>66</sup> o construcción de una *mirada o percepción significada* en los alumnos, a partir de los trabajos de Carnot, Clausius y otros por lo que con esa actividad, la zona y el nivel epistemológico es el empírico.

Entre las intenciones educacionales que destacan los profesores de la muestra, están las que implican la “aplicación correcta de las ecuaciones matemáticas que involucran a la entropía y la consecución de una comprensión del concepto que se manifieste en la capacidad del alumno para plantear soluciones y explicaciones empíricas o teóricas a los problemas propios del área”, ello se corresponde con las características planteadas para las zonas formal y racional respectivamente del perfil epistemológico, que son las zonas que corresponden propiamente al nivel universitario.

La intención común en los profesores entrevistados de alcanzar altos niveles de ejecución en sus alumnos, se traduce en privilegiar los criterios de aplicación para la evaluación conceptual en los estudiantes, por encima de los criterios para la comprensión. Este énfasis promueve estrategias de ejercitación y de solución de problemas en el aula. Sin embargo hay diferencias entre los profesores. Aquellos con formación química, dan más peso a la aplicación y aparece en orden inverso, (la comprensión sobre la aplicación), en los profesores con formación física.

Lo anterior, ubica a todos en el nivel epistemológico teórico pero, predomina la zona formalista en los que enfatizan la aplicación-comprensión en su evaluación, y la zona racionalista en los profesores que priorizan la comprensión por sobre la aplicación en su evaluación.

La construcción de la capacidad para la aplicación informada y exitosa del concepto de la entropía en problemas prácticos, se facilitará si existe claridad en la potencia aplicativa de la

<sup>65</sup> Se considera una suposición plausible pues la Guía no explora las intenciones del profesor.

<sup>66</sup> Creemos que la “visión científica” que aluden Ribeiro y Mortimer (2004) se corresponde con lo que hemos llamado la construcción de una *mirada o percepción significada* en el alumno.

representación en uso. El conocimiento de la aplicabilidad deviene del análisis de cada representación con relación al nivel o zona epistemológica en que se ubique.

La enseñanza universitaria de la entropía privilegia el nivel epistemológico teórico y las zonas formalista y racionalista, pero descuida o corre el riesgo de descuidar el nivel empírico que permite articular las transiciones entre las zonas del perfil.

Es de destacar que sin el papel del libro de texto y/o del profesor como agentes de vinculación entre los niveles y las zonas, los alumnos por si mismos, difícilmente superarán el nivel perceptivo/intuitivo. Lo señalado conlleva a la planeación de actividades cuidadosamente seleccionadas para el desarrollo de la enseñanza en la fase de acción.

En la fase de acción que se presenta enseguida, se concretan todos los elementos mencionados relacionados con la entropía, como un ejemplo de integración de cada aspecto revisado en este trabajo.

### 5.5.2 Fase II. De acción. Desarrollo de la enseñanza

La fase reflexiva anterior, conduce a una actividad docente de tres etapas, que utiliza los perfiles epistemológicos en las etapas de inicio y cierre de un curso, para el seguimiento de la evolución de los conceptos en su construcción- apropiación por parte de los alumnos, y en la etapa 2 intermedia, introduce al alumno a la cultura disciplinaria, familiarizándolo con los contenidos desprendidos dosificadamente de cada componente de la matriz disciplinaria de Kuhn

#### *5.5.2.1 Fase II Etapa 1. Perfiles Epistemológicos previos*

La exploración de los perfiles epistemológicos de los alumnos es un paso imprescindible que responde a la necesidad de realizar una indagación previa del conocimiento conceptual que poseen los estudiantes para seguir la evolución del mismo y conocer su logro final. La indagación difiere de las comunes (como puede ser un examen de diagnóstico o algún otro

aplicado por el profesor) porque es una autoexploración y una expresión libre del sujeto, "... el perfil epistemológico relativo a un concepto designado, vale sólo para un espíritu particular que se examina a sí mismo..." (Bachelard, 1992, p.37).

Para ello se solicita al alumno la explicitación por escrito de todo lo que conozca alrededor del concepto en términos de definiciones y representaciones y de su nivel de dominio del concepto.

Como sugerencia didáctica, derivada de Bachelard, inmediata y posteriormente a esta actividad, el profesor introduce la dimensión epistemológica con sus tres niveles (realismo, empirismo, racionalismo) para hacerla corresponder, junto con sus alumnos, a los niveles cognitivos gruesos expresados por ellos.

Se sugiere aquí: 1) la elaboración gráfica de cada perfil en el plano cartesiano (análoga a la elaborada por Bachelard, mostrada en la Figura 5.4); 2) su contrastación con los perfiles de los otros alumnos en una discusión colectiva, y 3) su resguardo para comparaciones individuales y grupales posteriores. En esta etapa el alumno adquiere conciencia de su perfil en términos epistemológicos para el concepto analizado.

#### *5.5.2.2 Fase II. Etapa 2. Construcción-Apropiación del contenido disciplinario*

La etapa intermedia de construcción-apropiación del concepto, está conformada por todas las actividades que el profesor planea y lleva a cabo comúnmente en su salón de clases, pero en esta propuesta, deben estar orientadas por el análisis didáctico de planeación realizado en la primera fase.

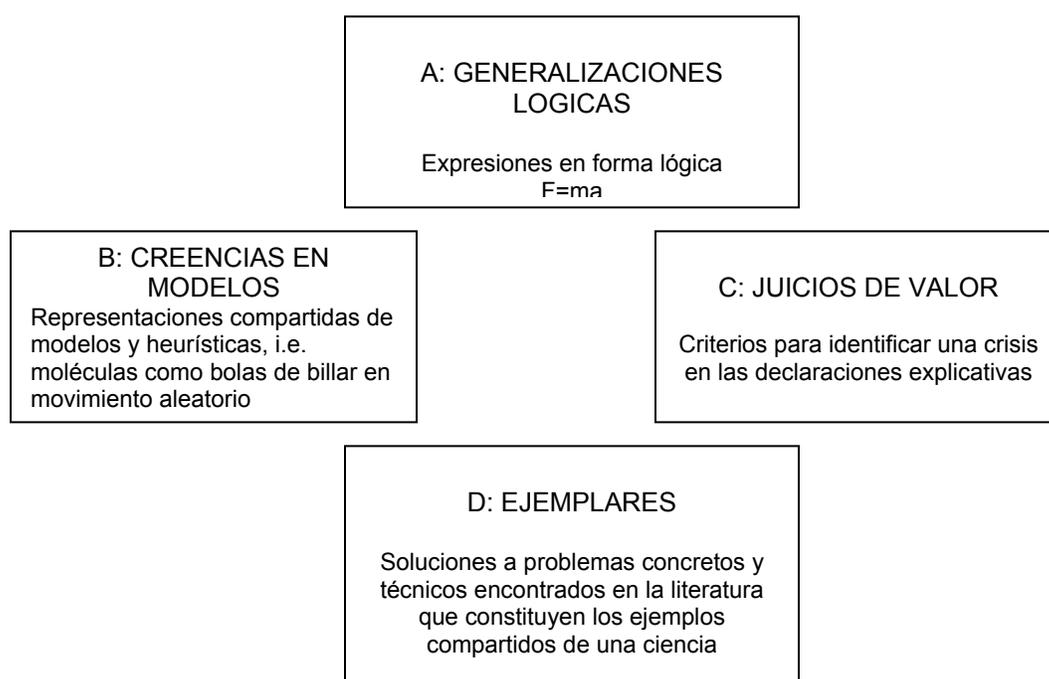
Con base en la planeación de la Fase I, de cada componente de la matriz disciplinaria de Kuhn (Figura 5.5), se tendrán seleccionados los contenidos a enseñar desprendidos de esas categorías.

Utilizando la noción de perfil epistemológico de Bachelard, se conocerá la posición epistemológica de los conceptos y con él su nivel de complejidad. Con base en el perfil

conceptual de Mortimer se harán corresponder las estrategias y la intención didáctica con las zonas de comprensión<sup>67</sup> del contenido, entendiendo, de acuerdo con Ribeiro y Mortimer (2004), que: a) el nivel o zona perceptivo-intuitiva aparece cuando la intención didáctica explora las ideas previas; b) el nivel empírico aparece cuando la intención del profesor es la de generar un problema, verificar experimentalmente ideas científicas y aplicar la visión científica o percepción significada, c) el nivel teórico y las zonas formalista y racionalista aparecen, a su vez, cuando se aplican las generalizaciones lógicas (fórmulas) en problemas o ejercicios específicos y se describe la visión científica.

#### 5.5.2.2.1 Matriz Disciplinaria

Para continuar con la Etapa 2 de la segunda fase, describimos e ilustramos los contenidos de la matriz disciplinaria con el concepto de entropía y se plantean algunas sugerencias didácticas.



Fuente: Duschl & Gitomer, 1991, p. 844.

**FIGURA 5.5 Matriz Disciplinaria de Kuhn**

<sup>67</sup> El nivel de comprensión no se alcanza necesariamente por el sólo conocimiento de las leyes y, principios y relaciones matemáticas, sino además a través de la realización de problemas ejemplares. (Kuhn, 1971, p.290)

### Componente A

Al componente A de la matriz disciplinaria, corresponderán todos aquellos contenidos derivados de razonamientos lógicos y/o lógico-matemáticos “desplegadas sin duda ni disensión por los miembros del grupo, (comunidad disciplinaria), (...) que funcionan en parte como leyes pero también como definiciones de los símbolos que muestran. (Kuhn 1971, p. 281).

Las leyes de la termodinámica y la expresión matemática de Clausius para la entropía, están dentro de esta categoría; conocimientos que, siguiendo a Bachelard, se sitúan en el nivel racionalista (el nivel de mayor complejidad en el perfil epistemológico del individuo) y, conforme a Mortimer, se ubicarían en el nivel teórico.

### Componente B

Los contenidos del componente B se refieren a lo que se sigue entendiendo como definición de paradigma, es decir a los compromisos compartidos, a las creencias en los modelos propios y particulares de esa matriz disciplinar, (Kuhn, 1971, p. 282). En relación con la entropía, aquí estarían ubicados los modelos de concepción del calor, la teoría corpuscular de la materia, la teoría cinético-molecular, la entropía como transformación. En nuestro trabajo serán los hilos de la trama disciplinaria (Figura 2.3) que determina el sentido disciplinario, el “nudo” del concepto. En palabras de Kuhn, “(...) los modelos dan al grupo sus analogías y metáforas preferidas, y al hacer esto ayudan a determinar lo que será aceptado como explicación y como solución de problemas” (Kuhn 1971, p.283).

Es en los contenidos de este componente B, donde es posible llamar la atención de los alumnos hacia *una observación con carga teórica*, hacia la noción de una *percepción significada*. Tal noción es importante para entender la aparición de los modelos como una necesidad heurístico-explicativa en el desenvolvimiento de una disciplina y de sus conceptos. Desde esta perspectiva, la presentación de la entropía como integrante de un modelo que Clausius elabora para explicar y explicarse las transformaciones energéticas que sufre un cuerpo (un sistema) debido a intercambios térmicos, la hará aparecer menos abstracta.

La elaboración de modelos explicativos por parte de los alumnos enfrentados a ciertas situaciones problemáticas reales o ficticias y ensayando *percepciones significadas* con diferentes cargas teóricas, modificando el “*ver como*,” sería altamente recomendable.

### Componente C

Los contenidos de la componente C, son los valores que una comunidad comparte y que permiten establecer criterios de demarcación disciplinaria. En el caso de la entropía la controversia entre Maxwell y Tait (Harman 1962), con Clausius, proporciona un ejemplo excelente de las consecuencias de la aplicación de los valores de un campo disciplinario y de los criterios de exclusión que de allí se derivan.

Se ha reiterado que la “desaparición” de la expresión original de Clausius fue consecuencia de esta controversia, pero fundamentalmente fue el efecto de la aplicación de los valores de una comunidad disciplinaria incipiente que, como un resultado adicional, se afirmó y consolidó.

El comportamiento de Clausius “fuera de la norma” es explicado por Kuhn cuando señala que “...en un grado más considerable que en las otras clases de componentes de la matriz disciplinaria, los valores deben ser compartidos por personas que difieren en su aplicación (...) la variabilidad individual en la aplicación de los valores compartidos puede servir a funciones esenciales para la ciencia(...) si nadie reaccionara a las anomalías o a las flamantes teorías de tal manera que se corrieran grandes riesgos, habría pocas o ninguna revoluciones.” (pp. 284-286).

Clausius corrió el riesgo de explicar la entropía con un modelo mixto, incompatible con el marco macroscópico e inaceptable en su época. Flexibilizando esa postura, aquí hemos defendido la utilidad didáctica de la expresión rechazada, sin comprometer, por falta de datos, afirmación o negación alguna en cuanto a su utilidad en otros campos.

Los valores de una disciplina no se enseñan propiamente, se ejemplifican y muestran en su aplicación en situaciones donde la demarcación es necesaria.

## Componente D

En el componente D, se ubica el conjunto de soluciones específicas a problemas propios de la disciplina que Kuhn denomina (problemas) “ejemplares” y de cuya ejercitación “con o sin ayuda de su instructor, el estudiante descubre una manera de ver el problema como un problema que ya había encontrado antes. Una vez captada la similitud, percibida la analogía entre dos o más problemas distintos, puede interrelacionar símbolos y relacionarlos con la naturaleza de las maneras que han resultado efectivas antes” (pp. 286)

En este componente D, debe colocarse la actividad de resolución de problemas que es a la que se le dedica el mayor porcentaje del tiempo dentro y fuera de clase. Kuhn justifica esta tendencia en las clases de ciencia al afirmar que la insistencia en la resolución de problemas en la enseñanza de ciencias es imprescindible pues de ella, se adquiere “(...) la capacidad resultante para percibir toda una variedad de situaciones similares para una generalización simbólica, que es en mi opinión lo principal que adquiere un estudiante al resolver problemas ejemplares sea con papel y lápiz o en un laboratorio bien provisto” (pp.290)

Respecto a la entropía, atendiendo este último punto, existen problemas en todos los libros de texto de termodinámica y, particularmente, el libro de Abbott y Vanness (1989), proporciona una extensa variedad de ellos. Una selección cuidadosa de problemas ejemplares, permitirá abarcar todos los niveles epistemológicos marcando con ellos las intencionalidades de logro de los profesores.

### 5.5.2.2.2 *Una presentación alternativa del concepto de entropía*

La Fase II en su Etapa 2. continúa con el desarrollo de una propuesta de enseñanza para la entropía que se inscribe principalmente en los componentes A y D de la matriz disciplinaria de Kuhn. En la presentación de este desarrollo alternativo para la entropía se toma en cuenta la expresión original de Clausius y las tres especies de transformaciones de Clausius, también se basa en algunas de las conclusiones a las que se ha llegado en este estudio. Estas conclusiones aparecen en cursivas y abren la pauta para su comentario y ampliación. Por otro lado, se presenta además el análisis del problema de Brosseau y Viard a partir de la expresión original de Clausius como una muestra de su poder explicativo y se concluye esta propuesta

de enseñanza para la entropía, resaltando algunos aspectos que como el histórico -en conjunto con otros aspectos que aquí hemos resaltado- deben ser tomados en cuenta en cualquier propuesta que se estructure para enseñar la entropía.

Como punto inicial del desarrollo alternativo para la entropía, destacamos el carácter principal que determina el planteamiento original de Clausius.

***La comprensión integral del concepto de entropía requiere del conocimiento de la concepción macroscópica y microscópica de la misma.***

Como consecuencia de la controversia surgida a partir de la aplicación ortodoxa de los valores disciplinarios, se ha dicho que los libros de texto de termodinámica clásica ignoran el sentido físico de Clausius desde una perspectiva mixta. No obstante, consideramos necesario en esta propuesta presentar el sentido físico disciplinario de Clausius, apelando a la “intuición”, de tal manera que sea posible dar una respuesta correcta a preguntas como la planteada por Brosseau y Viard, y que sea un camino alternativo para entender la entropía a partir de la noción de “transformación”.

Cuando nos referimos a “apelar a la intuición” sobreentendemos una “intuición informada” con los conocimientos básicos para entender los desarrollos de Clausius y Boltzmann. Desde este requerimiento indispensable, se tiene que la comprensión del concepto de entropía solo podrá ser alcanzada en el nivel superior. En los niveles educativos previos la comprensión seguirá siendo aproximada.

Al subrayar que el desarrollo y los contenidos que se presentan enseguida se corresponden principalmente con las “generalizaciones lógicas” y las soluciones “ejemplares” que constituyen los componentes A y D de la matriz disciplinaria de Kuhn, se regresará a Clausius para tratar de construir una alternativa para la comprensión de la entropía a través del análisis del cambio en la entropía en la situación correspondiente a la expansión reversible adiabática de un gas.

*Una alternativa didáctica para la comprensión de la entropía*

Se inicia con la adopción como base de la noción de *transformación y sus clases* a partir de la ecuación original con la que Clausius expresa sintéticamente y matemáticamente su Principio de Equivalencia de las Transformaciones, a saber:

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dz \quad (1)$$

Las transformaciones de la primera clase o especie, recordemos, son aquellas que toman en cuenta el cambio de calor a trabajo y de trabajo a calor. Estas transformaciones están expresadas en el primer miembro de (1) y sólo están ligadas a una perspectiva macroscópica.

Visión Macroscópica (trabajo exterior)

Considérese al cuerpo o sistema como una caja negra describible en términos de las variables macroscópicas PVT, si el sistema se ve macroscópicamente como una caja negra ¿qué percibimos del cuerpo o sistema cuando se da el fenómeno planteado por Brosseau y Viard si suponemos que PVT son medibles? Exterior y macroscópicamente, se aprecia que el cuerpo aumenta su volumen pero sin que exista pérdida de calor del cuerpo y sin que se le haya proporcionado calor ni se le haya aplicado fuerza exterior alguna. ¿Cómo puede explicarse esto un observador informado, aún sin preguntarse nada sobre la entropía?

Puesto que lo que ve es un “efecto”, aumento de volumen y se sabe o se aprecia que no ha habido intercambio térmico ni mecánico alguno entre el sistema y los alrededores, de la primera ley se tiene que:

$$\Delta U = \Delta Q + W \quad ; \quad \text{donde} \quad \Delta Q = 0$$

por tanto

$$\Delta U = W_{\text{interno}} = PdV$$

Que se interpreta diciendo que el cambio del volumen se debió a un cambio en la energía interna del cuerpo, cambio que se refleja a su vez macroscópicamente en una disminución

(cambio) en las otras variables termodinámicas P y T que definen al sistema, esto es, se realizó un trabajo interno pero el *trabajo externo es nulo*.

Si nos preguntamos ahora acerca del cambio en la entropía, entendida ésta macroscópicamente con Clausius como “el valor o contenido de transformación de un cuerpo”, cabría preguntarse si hubo alguna transformación<sup>68</sup>. La respuesta tendría que ser negativa porque el proceso de expansión se realizó en condiciones adiabáticas por tanto el cambio en la entropía no se dio. Esto es, la entropía inicial no sufrió cambio alguno al final del proceso. Macroscópicamente la entropía se mantuvo constante en el cuerpo o sistema, conclusión que responde correctamente a la situación planteada por Brosseau-Viard.

Pensando en la enseñanza del concepto en el nivel superior, y quizá desde el bachillerato, (nivel educativo previo al universitario), podría presentarse al alumno el concepto completo de entropía de Clausius introduciendo las transformaciones de segunda y tercera especie.

Como ejemplo, partimos de la ecuación ampliada:

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$$

en la que, como se ha repetido, el miembro izquierdo ofrece la definición de la entropía desde la visión macroscópica y está relacionada con las transformaciones de la primera especie.

Analicemos un proceso isotérmico y uno adiabático (que son los que constituyen el Ciclo de Carnot) haciendo uso de las transformaciones de Clausius.

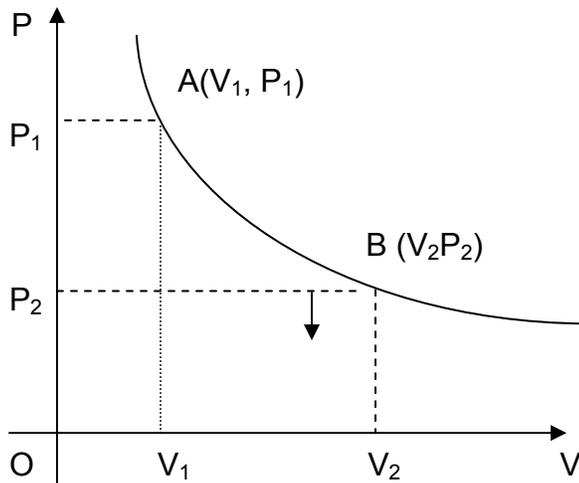
Para poder seguir con el desarrollo del ejemplo, será necesario tener presentes las siguientes expresiones mismas que tendrán que ser del conocimiento previo de los alumnos pues corresponden a los antecedentes de la segunda ley y consecuentemente de la entropía:

(1)	$PV=n R T$	Ecuación General de los gases
(2)	$\Delta U=Q + W$	Primera Ley de la Termodinámica
(3)	$W=P d V$	Trabajo
(4)	$Q=T \Delta S$	Calor en términos de S
(5)	$K =3 R T/2$	Energía cinética media
(6)	$v^2=3 R T/m$	Velocidad media cuadrática de las moléculas de un gas.
(7)	$\Delta U=f R \Delta T/2$	Energía interna de un mol de gas ideal, donde f son los grados de libertad
(8)	$C_v = f R/2$	Calor específico molar a volumen constante. f son los grados de libertad.

<sup>68</sup> Nos referimos a transformaciones de primera especie esto es de las transformaciones de trabajo en calor o de calor en trabajo pues son las únicas que se toman en cuenta bajo la perspectiva macroscópica.

Transformación isotérmica (ver figura)

En una transformación isotérmica, se hace variar el volumen del gas, alterando la presión a que está sometido sin permitir que varíe su temperatura. El calor que absorbe es numéricamente igual al trabajo realizado, el cual está dado por el área bajo la curva PV.



En la transformación isotérmica el gas pasa por una sucesión de estados de equilibrio. El trabajo realizado por el gas al expandirse isotérmicamente está representado por el área bajo la curva y, puesto que la temperatura no varía, la energía permanece constante, esto es:

$$\Delta U = 0$$

Por (2), (ver la lista de expresiones),  $Q = W$  es decir, el calor absorbido por el gas a temperatura constante, es igual al trabajo realizado por el gas.

Pero, ¿qué ocurre con la entropía? Matemáticamente, haciendo uso de las relaciones anteriores se tiene que:

$$T \Delta S = P \Delta V$$

$$y \quad \Delta S = P \Delta V / T \quad ; \text{ pero } T \text{ es constante}$$

por lo que  $\Delta S \propto P \Delta V$  donde  $\alpha$  representa proporcionalidad

y, regresando a Clausius, ¿qué tipo de transformaciones ocurren?

- a) Como  $Q \neq 0$ , la transformación de primera especie sí ocurre, al transformarse el calor recibido por el sistema en trabajo de expansión

- b) Como  $T = \text{constante}$ ,  $\Delta U = 0$ , lo que implica que el término  $\int dH/T$ , de la expresión original de Clausius, que está relacionado con el cambio de la velocidad y la energía cinética de las partículas (transformaciones de segunda especie) no sufre cambio alguno por lo que la llamada entropía cinética tampoco se modifica.
- c) La expansión volumétrica originada por el trabajo realizado sobre el sistema, hace que las moléculas se separen entre sí, dando lugar a un cambio en la entropía que depende de la disgregación (llamada entropía espacial o volumétrica) y que corresponde a una transformación de tercera especie.

Por lo anterior se concluye que: **en una transformación isotérmica ocurren transformaciones de 1ª y 3ª especie y no ocurren transformaciones de 2ª especie.**

Si expresamos la entropía como sigue, se tiene que:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{cinética}} + \Delta S_{\text{volumétrica}}$$

$$\text{Pero } \Delta S_{\text{cinética}} = 0$$

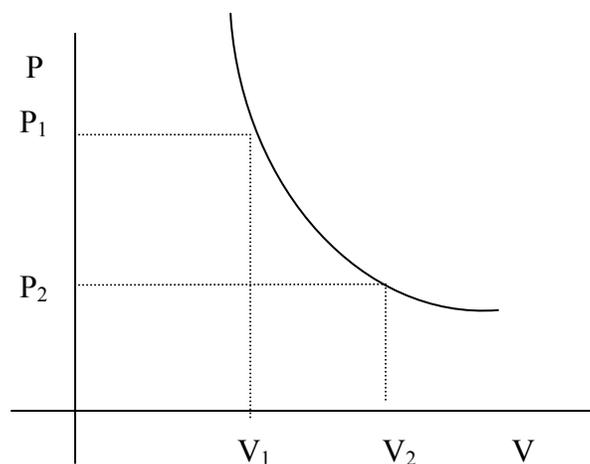
Entonces

$$\Delta S = \Delta S_{\text{volumétrica}}$$

lo que implica un cambio en la configuración interna del sistema, conclusión que es consistente con la percepción macroscópica del aumento del volumen.

Transformación Adiabática (Ver Figura)

En una transformación adiabática varía el volumen del gas, se altera la presión a la que está sometido y la temperatura, pero no se permite la entrada ni salida de calor.



En esta transformación, macroscópicamente, se detecta una expansión volumétrica (pese a que  $\Delta Q = 0$ ) esto es, pese a que no ocurren transformaciones de primera especie ¿Cómo explicar esto? macroscópicamente **no es posible**. La explicación en este caso tiene que buscarse en consideraciones microscópicas como hizo Clausius, por lo que se tiene que, de acuerdo a (2) y (3)

$$-\Delta U = W = PdV$$

que nos dice que el trabajo realizado por el sistema (de ahí el cambio en el volumen) es igual al valor negativo de la variación de la energía interna del sistema y siendo así, ¿qué transformaciones ocurren?

**a) No ocurren transformaciones de primera especie, pues**

$$\Delta Q = 0 \quad \text{y} \quad \Delta S = 0$$

**b) Si ocurren transformaciones de segunda especie**

El cambio en la energía interna es de disminución que se refleja en una disminución en la velocidad media cuadrática de las partículas microscópicas (moléculas) del gas, lo que a su vez, da lugar, por la expresión (6), a una reducción del valor de la temperatura. Estas transformaciones de segunda especie, ocurren dentro del sistema por lo que en las transformaciones adiabáticas la entropía cinética en este proceso, tiene un valor diferente de cero,  $\Delta S_{\text{cinética}} \neq 0$ .

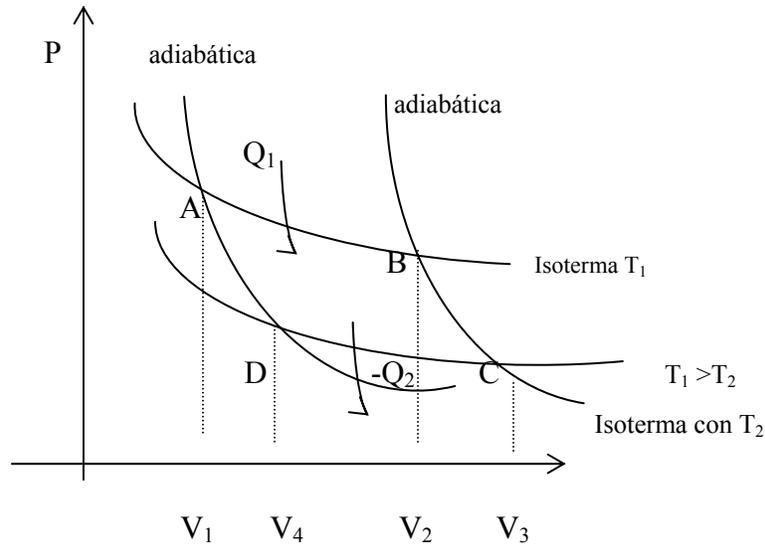
**c) Si ocurren transformaciones de tercera especie.**

El trabajo realizado por el sistema implica una modificación en la disgregación del mismo, lo que da lugar al aumento en el volumen. Es decir, las transformaciones de tercera especie sí ocurren en las transformaciones adiabáticas, y el valor de la entropía volumétrica es diferente de cero:  $\Delta S_{\text{volumétrica}} \neq 0$ .

Ambos cambios, el de la entropía cinética y el de la entropía volumétrica son iguales y de signo opuesto por lo que un cambio contrarresta al otro, y por tanto no hay cambio en la entropía total, lo que concuerda con la respuesta esperada, y nos conduce al siguiente enunciado.

**Los procesos termodinámicos pueden ser analizados entrópicamente a partir del concepto original de Clausius que involucra las tres especies de transformaciones.**

Para probar lo anterior, analicemos de esta manera el Ciclo de Carnot. Sabemos que en tal ciclo ocurren dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos así, el análisis entrópico sería:



### Ciclo de Carnot

1. De A a B ocurre una expansión isotérmica. Del desarrollo anterior:

$$\Delta S_{AB} = \Delta S_{\text{volumétrica}} \quad \text{donde } V_2 > V_1$$

$$\Delta S_{AB} = Q_1/T_1 = \Delta S_1$$

2. De B a C ocurre una expansión adiabática así que macroscópicamente,  $\Delta S = 0$  y microscópicamente,  $\Delta S_{\text{cinética}} = \Delta S_{\text{volumétrica}}$  donde  $V_3 > V_2$
3. De C a D ocurre una compresión isotérmica por lo que, de manera análoga:

$$\Delta S_{CD} = \Delta S_{\text{volumétrica}} \quad V_4 < V_3$$

$$\Delta S_{CD} = -Q_2/T_2 = \Delta S_2$$

4. De D a A ocurre una compresión adiabática en la cual  $\Delta S = 0$  y, de nuevo

$$\Delta S_{\text{cinética}} = \Delta S_{\text{volumétrica}}$$

La variación de la entropía al término del ciclo será, desde una apreciación macroscópica,

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q_1/T_1 - Q_2/T_2$$

Como

$$Q_1/T_1 = Q_2/T_2$$

entonces

$$\Delta S = 0$$

es decir, la entropía permanece constante cuando se cumple un ciclo de transformaciones reversibles como las que ocurren en un ciclo de Carnot.

En términos más amplios, y tomando en cuenta las transformaciones microscópicas de 2ª y 3ª especie, se tiene que:

1. De A a B ocurren transformaciones de primera especie -de calor a trabajo- y de tercera especie en la que se dan cambios en la disgregación -en el volumen- mientras que las transformaciones de segunda especie no ocurren al permanecer constante la energía interna.
2. De B a C,  $Q = 0$  y  $\Delta S = 0$  esto es, las transformaciones de primera especie (enfoque macroscópico) no ocurren, pero sí ocurren transformaciones de 2ª y 3ª especie. Son estas transformaciones las que permite explicar desde Clausius y a partir de su enfoque microscópico, el cambio en el volumen.

De manera análoga (pero opuesta a 1. y 2.) se pueden analizar los procesos CD (isotérmico) y DC (adiabático).

Así, con los desarrollos anteriores se ha mostrado como presentar el concepto de entropía tomando como base la definición original de Clausius

Desde luego dentro de la propuesta de enseñanza, y tomando en consideración la componente D, de la matriz disciplinaria de Kuhn es conveniente ampliar el número de problemas ejemplares.

#### *5.5.2.3 Fase II. Etapa 3 Perfiles Epistemológicos al término del proceso*

La etapa de cierre es particularmente propicia para evaluar el nivel de logro alcanzado por los alumnos en la comprensión de la entropía a través de los perfiles epistemológicos, Para ello se solicitará al alumno la elaboración de su nuevo perfil epistemológico para la entropía y se contrastará con el previo realizado en la etapa 1 y con los perfiles correspondientes a los de sus compañeros, en un ejercicio individual y colectivo, actuando el profesor como guía de manera semejante a lo descrito en la etapa 1 de inicio de la Fase II.

Este ejercicio evidenciará de nueva cuenta, la existencia en los alumnos de diferentes representaciones, multirrepresentacionalidad que ahora, al decir de Flores (2004), es motivo de investigación desde diversos enfoques<sup>69</sup> y un campo que ha mostrado ser fructífero pues describe cómo los sujetos mantienen coexistiendo y usan sin contradicción distintas aproximaciones de una fenomenología específica movilizándolo una representación u otra según lo requiera la demanda del contexto de aplicación.

No está de más reiterar que detrás de cada representación está un “*mirar como*” una interpretación personal producto de *una percepción significada* que determina la red de conceptos y la trama disciplinaria en la que cobra sentido el concepto representado.

Hemos afirmado que tanto en los alumnos con poco bagaje informativo, como en las personas conocedoras de la termodinámica, como son los profesores de ese campo, se manifiestan sin conflicto diferentes representaciones para la entropía, cada una con ubicación en alguna zona del perfil epistemológico de Bachelard

El profesor, para terminar con los elementos sugeridos para una enseñanza alternativa de la entropía, podrá profundizar la discusión con la introducción de diferentes definiciones para la entropía como las que se enlistan a continuación y confrontarlas entre sí y con las de los alumnos. Algunas de las definiciones son comunes en la literatura del tema y otras son planteadas a partir de nuestro estudio. Lo importante de este ejercicio, (que puede ser realizado en otras etapas) radica en darse cuenta, (y se propone analizarlas desde esa perspectiva), de que son *representaciones sintéticas* de un *mirar como*, de un conocimiento tan extenso que puede abarcar todos los elementos de esta propuesta, incluyendo los componentes correspondientes a la matriz disciplinaria de Kuhn. El análisis a profundidad de algunas de estas definiciones o de todas ellas y de otras más no enumeradas, se recomienda ampliamente.

La entropía es:

- El valor de transformación de un cuerpo
- la medida del valor de transformación de un cuerpo
- la capacidad que tiene un cuerpo (sistema) para “cambiar” o “modificarse” debida a Intercambios de calor.

---

<sup>69</sup> Además de Mortimer (1995); Pozo, Gómez, y Sanz, (1999), Taber, (2001) y Flores y Gallegos (1998;2001)

- la medida de la capacidad que posee un cuerpo (sistema) para transformarse espontáneamente en la dirección de su valor máximo.
- la medida de las transformaciones (cambios térmicos) que ha sufrido un cuerpo. (A mayor entropía mayor número de transformaciones sufridas).
- la medida de la capacidad que posee un sistema para transformarse espontáneamente en la dirección de su valor máximo
- una propiedad del sistema
- una medida de la desorganización de un sistema
- una medida de las restricciones de un sistema

### 5.5.3 La Historia: Elemento imprescindible

Cerramos este apartado dedicado al desarrollo de la Propuesta, con el señalamiento de que la historia es un elemento importante.

De manera implícita la dimensión histórica aparece en los elementos de la propuesta de enseñanza pero, una enseñanza de la entropía<sup>70</sup> que se proponga tomar como base la expresión original de Clausius, requiere que se tomen en cuenta de manera explícita los siguientes elementos:

- i- la historia y el contexto en donde surge el concepto de entropía
- ii- el carácter mixto de la explicación-justificación de Clausius para la entropía
- iii- el seguimiento histórico-diacrónico del concepto de entropía

En relación al punto i, nos adherimos a la posición que defienden los miembros del grupo de “Historia, Filosofía y Enseñanza de la Ciencia<sup>71</sup>” respecto a la importancia de incluir el aspecto histórico y el de la filosofía de la ciencia en la enseñanza. Más aún, estamos convencidos de que la historia es la única vía de acercamiento para entender no sólo el origen y el carácter mixto de la entropía de Clausius, sino también para comprender otros conceptos que constituyen la trama disciplinaria de la termodinámica.

<sup>70</sup> Se piensa en un curso introductorio de termodinámica

<sup>71</sup> History, Philosophy, and Science Education group (HPST) es una organización internacional que promueve el mejoramiento de la educación de la ciencia a partir de informar desde la historia y la filosofía, a la teoría, a la pedagogía y al currículo.

En el segundo punto ii, se enfatizará la existencia de la expresión original de Clausius, su carácter mixto, su intencionalidad y las transformaciones con las que está relacionada. La realización de ejercicios de aplicación es aquí particularmente oportuna. Así como el llamar la atención hacia las interrelaciones de la entropía con los nudos de la trama disciplinaria de la que forma parte.

Complementariamente en el tercer punto iii, el seguimiento histórico-diacrónico del concepto permitirá introducir de manera legítima, pero lateral en un curso de termodinámica, el planteamiento estadístico de Boltzmann para la entropía

Por último, el reconocimiento de la necesidad de incluir el aspecto histórico en la enseñanza de la entropía se evidencia también en las experiencias reseñadas para la enseñanza de la entropía (Sección, 5.3), en un obstinado regreso que puede reflejar lo que Bachelard Señala como “retornos hacia conductas realistas (...) el realismo desaloja al racionalismo.” (Bachelard, 1992, p.25).

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La indagación que nos propusimos en este trabajo, de realizar el seguimiento de la evolución de un objeto de estudio tan preciso y particular como es un concepto específico dentro de una trama disciplinaria -la entropía dentro de la termodinámica- aunado al interés educativo por investigar las dificultades de su enseñanza, conformó una problemática particular que hizo de la atipicidad uno de los rasgos de esta investigación. Al respecto, es atípica en al menos dos puntos:

- En el planteamiento de un análisis enfocado más en los sujetos y sus discursos alrededor del concepto de entropía y menos en el contenido general de la termodinámica y
- En la aproximación basada en la filosofía de la ciencia y las categorías construidas como herramienta de análisis

Efectivamente, en el estudio de los sujetos, se proponen los términos de *constructores*, *continuadores* y *difusores* para clasificar las fuentes de los discursos y las categorías analíticas de *significación conceptual* y de *significación perceptual* que permiten el planteamiento epistemológico del “Campo de conceptualización”. (Figuras 2.1 y 2.2).

Siendo una investigación de estructura diferente resulta de interés señalar que presenta coincidencias con el “Modelo de reconstrucción educativa” (Duit *et al* 2005), modelo que es presentado por Duit (2006) como un marco de referencia para la investigación en enseñanza de las ciencias y que conocimos recientemente a través del trabajo de López (2006). Efectivamente, Duit (2006) plantea a la enseñanza de la ciencia como una disciplina con carácter interdisciplinario carácter que, afirma, se traslada a la investigación en ese campo.

En nuestra propuesta, cercana a ese carácter, construimos un acercamiento multidisciplinario y metodológicamente distinto al romper con el seguimiento de una secuencia tradicional única (objetivo, procedimiento, resultados y conclusiones) para sustituirla por una propuesta de doble vertiente de estudio y una secuencia de actividades también duplicada en la que los resultados de la primera vertiente contribuyen al análisis de la segunda.

La conocida afirmación de que “la elección del objeto determina el método”, fue confirmada en este trabajo pues la separación del estudio en las vertientes histórica y educativa, dio lugar, a la construcción de un marco en el que se planteaban dos aspectos teórico-metodológicos: uno filosófico pre-fijado de antemano -por tener claridad desde la planeación, del material documental escrito que constituiría la muestra a revisar en la vertiente histórica- y otro complementario, para el estudio de la vertiente educativa, de índole imprecisa *a priori*, por depender de los resultados del trabajo de campo planeado y de los resultados de la primera vertiente.

La complementación teórica al marco filosófico -para dar cuenta de las respuestas de los profesores y para la estructuración de algunos elementos para la enseñanza de la entropía- se encontró en los estudios de Bachelard, Mortimer y Kuhn. Las categorías analíticas obtenidas a partir de estos autores permitieron profundizar el análisis y enriquecer la fundamentación de la propuesta de enseñanza.

Conscientes de que las conclusiones son la parte final de un argumento, entendido aquí como un discurso que proporciona razones para una conclusión que se desea sostener, anunciamos que el contenido de este capítulo se presenta bajo la suposición de que las razones que sostienen las conclusiones de este capítulo han sido dadas y constituyen todo el desarrollo de esta investigación. Señalamos además, que partimos de tomar en consideración los objetivos generales explicitados en el primer capítulo y de acuerdo con la doble organización metodológica que se siguió en esta investigación. Esto es, enunciamos las conclusiones respecto a la Vertiente Histórica con los constructores y continuadores para, posteriormente, plantear las conclusiones derivadas de la Vertiente Educativa, con los difusores: autores de libros de texto y profesores.

Posteriormente, destacamos los que consideramos los hallazgos más significativos de este trabajo, damos una respuesta breve a las interrogantes iniciales desprendidas del trabajo de Brosseau y Viard, comentamos algunas definiciones para la entropía y establecemos una conclusión general.

Se termina con sugerencias para la continuación de esta investigación, atendiendo el concepto de entropía y su enseñanza

## 6.1 Vertiente Histórica. Constructores y Continuadores

### 6.1.1 Clausius. Planteamiento original para la entropía

Confirmamos que Clausius propone para la entropía, una expresión matemática que separa la entropía total en una componente cinética que depende de la temperatura, sumada a otra componente que depende de la configuración espacial de las partículas.

Asimismo, el significado físico para la entropía, Clausius lo construye a partir de su trabajo sobre las transformaciones de energía en un cuerpo sujeto a intercambios térmicos, mismo que conecta con el razonamiento matemático desarrollado para ese propósito, a través de la expresión

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ.$$

Por otro lado, se esclarece que la pérdida de la expresión original de Clausius, es debida a la Influencia del Contexto Científico-Cultural. Por lo que el contexto científico-cultural en donde se desarrollan las construcciones de la ciencia, juega un papel de enorme relevancia para la termodinámica y particularmente para el origen y la pérdida de la expresión original de Clausius.

La controversia surgida entre Maxwell, Tait y Clausius, considerada como un hallazgo de esta investigación, ejemplifica no sólo la influencia del contexto científico de la época, permeado por las pugnas entre una visión continuista de la materia *versus* la visión discreta de la misma,-esta última denominada y conocida como molecularismo- sino también la lucha por la hegemonía entre la ciencia que se desarrollaba en la ínsula británica *versus* la ciencia del continente europeo.

Ampliando la información acerca del entorno de ese tiempo, el Siglo XIX es caracterizado por la búsqueda de nexos causales entre lo que era observado y lo que esas observaciones presuponían en términos de la realidad microscópica. Todo era *visto* a través de un marco dinámico que relaciona movimientos, fuerzas y partículas invisibles. Tal marco era considerado validado por la mecánica de Newton y por el antiguo pensamiento atomista griego.

El nacimiento de la termodinámica se da en ese siglo circunscrito al ámbito europeo - particularmente con relación a los países como Francia con Carnot, a Alemania con Clausius y a Inglaterra con Joule, Mayer, Maxwell y otros-, y ocurre en un contexto científico en el que las ideas alrededor de la estructura corpuscular de la materia se expresan a través de la adhesión o no al molecularismo. Resulta singular sin embargo, que sin tener evidencias con base en las cuales abrazar o rechazar tales ideas, se hacía un uso heurístico del molecularismo, esto es, se utilizaba el concepto, pero se “suspendía el juicio ante diversas propuestas de explicación fenomenológicas basadas en el molecularismo y se trasladaba al futuro la respuesta definitiva acerca de la naturaleza de la materia” (Yamalidou, 2001, pp. 423-451).

En Inglaterra, Maxwell definía su postura aceptando la naturaleza discreta de la materia pero sin comprometerse con representación alguna de las moléculas individuales. En 1860 expresaba “...en lugar de decir que las moléculas son duras, esféricas o elásticas podemos decir, si queremos, que las partículas son centros de fuerza,... o cualquier otra cosa que nos acomode”. (Maxwell, 1890, citado por Yamalidou, 2001).

De esta manera sólo es posible entender **la desaparición de la propuesta original de Clausius** a partir de los elementos anteriores pues, aunque Maxwell, al igual que Clausius, otorgaba un carácter dinámico al calor como movimiento de partículas, insistía en el mantenimiento de una estricta separación entre los aspectos macroscópicos propios de la termodinámica y los aspectos microscópicos que aparecían en aquella época, como meramente especulativos.

El planteamiento original mixto de Clausius para la entropía era inaceptable y fue rechazado en el contexto científico inglés, hegemónico y poderoso, en el que se gestaban los criterios de demarcación de un paradigma naciente: la termodinámica.

Con este episodio de la historia de la termodinámica es posible atestiguar la manera en la que se va constituyendo una Matriz Disciplinaria como la caracteriza Kuhn. La fuerza del argumento racional, construido por Clausius no es suficiente para romper la cohesión entre los elementos que conforman los compromisos compartidos, y las creencias en modelos particulares que como función “dan al grupo sus analogías y metáforas preferidas y permisibles. Y, al hacer esto, ayudan a determinar lo que será aceptado como explicación y como solución de problemas” Kuhn (Posdata 1975, p 283)

De la expresión original de Clausius ( $\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$ ) solo persiste el primer miembro, el miembro macroscópico de la ecuación, que corresponde a la parte “permisible”, a la parte “aceptable” por las creencias paradigmáticas.

Así se constata que la componente A de la matriz disciplinaria de Kuhn, referente a las Generalizaciones lógico-simbólicas, cede, ante las componentes B y C que portan respectivamente los Compromisos, las Creencias, los Valores Paradigmáticos compartidos y los Criterios para los Juicios de Valor. En el enfrentamiento de dos actitudes: una racional *versus* lo aceptable, prevalece la segunda avalada por las creencias compartidas.

### 6.1.2 Boltzmann

En cuanto a Boltzmann, el contexto científico cultural en el que desarrolla su trabajo es, el mismo en el que se dan los planteamientos de Clausius, lo que significa que durante el periodo histórico del desarrollo de Boltzmann, persiste el enfrentamiento entre las visiones continuista y discreta de la materia.

Al adoptar tan decididamente la segunda visión, Boltzmann concita, de los seguidores de la primera, virulentos ataques en su contra, que no son sino otra manifestación de la defensa a

ultranza que adoptan en general los que se adhieren a los principios de un paradigma que se corresponde en este caso, con el paradigma continuista de la materia.

Boltzmann, desarrolla su trabajo, ubicado en el ámbito microscópico, en un ambiente hostil a sus ideas y tiene que combatir tanto a los que se oponen a una visión discreta de la materia como a los antiprobabilistas.

Boltzmann inaugura un nuevo paradigma a partir de la distribución de velocidades de Maxwell, del trabajo de Clausius, de unos pocos supuestos y de su intención de buscar enlazar “las leyes estadísticas del movimiento de moléculas de un gas con la segunda ley de la termodinámica”. Esto se expresa al deducir la expresión  $S = k \ln \Omega$  para la entropía.

Sin embargo, cuando la entropía es interpretada como desorden, se circunscribe su significación a la condición matemática de aleatoriedad impuesta por Boltzmann y relacionada con los cálculos probabilísticos. Boltzmann no interpretó ni “*vio como*” desorden a la entropía pero si la “*vio*”, con una “*mirada significada*”, relacionada con la probabilidad de los estados, creando así un nuevo significado para el concepto de entropía y otro campo disciplinario para la física.

### 6.1.3 Continuadores. La evolución de la entropía.

Con el estudio del trabajo de los continuadores, se sigue la evolución de la entropía y la búsqueda de las repercusiones de esa pérdida. Con los continuadores, es posible establecer que desde la perspectiva del desarrollo disciplinario, *no hay repercusión alguna* de una pérdida que, siendo tal, es desconocida o ignorada. Así, el desarrollo de la termodinámica sigue el proceso de maduración kuhniano por lo que, la termodinámica clásica con los continuadores entra en la etapa normal de maduración de un paradigma.

En esta etapa de acuerdo con Kuhn, se busca la aplicación, la ampliación y la consolidación de los logros disciplinarios y no su cuestionamiento. Es decir, la mirada “cargada con los compromisos teóricos compartidos” sólo “*ve*” lo que “*puede ver*”, sin duda ni cuestionamiento. Por lo que la “*significación conceptual*” y “*perceptual*” está pre-grabada y la mirada pre-

significada. No es posible entonces percibir vacíos en campos que se “*ven como*” completos. La trama disciplinaria con los “sentidos” que porta, permanece estática.

No obstante, pese al acuerdo general logrado en el campo, se desprenden dos interpretaciones o significaciones físicas para la entropía dentro de la termodinámica clásica: aquella a partir de Clausius que la relaciona con la energía en su cantidad y cualidad y, aquella otra, con Planck, que le otorga, como carácter principal a la entropía, la determinación de la posibilidad o imposibilidad de los procesos naturales.

Encontramos que, a partir de Planck, las descripciones de leyes y conceptos de la termodinámica clásica con los continuadores, son reiteraciones de las descripciones y definiciones de Clausius y Kelvin, sin más modificación que las diferentes presentaciones - como “proposiciones de prueba” (Planck), como axiomas (Sommerfeld), o la entropía como propiedad del sistema (Pippard y otros)-

Asimismo, el refinamiento matemático que se evidencia en los trabajos de los continuadores, fundamentalmente con Gibbs, se torna indispensable, toda vez que se “*ve como*” una necesidad para la “etapa normal” el ir ampliando cada vez más, las posibilidades de explicación y aplicación del paradigma (teoría o trama disciplinaria) en situaciones concretas.

A partir de la revisión histórica del concepto de entropía se puede concluir que:

1. El sentido físico de la entropía de Clausius descansa fundamentalmente en una explicación mixta, macroscópica y microscópica, de los procesos que ocurren como consecuencia de intercambios térmicos. Se basa en el principio relativo a los valores de equivalencia de las transformaciones, en las nociones Y y Z y en las transformaciones de segunda y tercera especie que representan.
2. El concepto de entropía de Clausius fue despojado de su significación física al interpretarlo, al “*verlo sólo como*” un concepto ligado a la expresión matemática  $\int dQ/T$ .
3. El significado actual para la entropía, dentro de la termodinámica clásica, es consecuencia de enfatizar los aspectos matemáticos del concepto y de ignorar el esfuerzo de inteligibilidad que Clausius propuso en su expresión original.

4. La significación más común para la entropía, relacionada con el desorden, se encuentra y construye “fuera” del campo de la termodinámica. Aparece dentro de la mecánica estadística de Boltzmann, en una interpretación incompleta de las condiciones que impone en su trabajo.
5. Se encuentran otras significaciones para la entropía que han sido construidas fuera de la termodinámica, como la que surge dentro de la teoría de la comunicación (información).
6. El carácter polisémico de la entropía, deriva de las distintas interpretaciones dentro de la propia termodinámica y de las otras interpretaciones que otras disciplinas le otorgan al concepto,
7. Como se ha defendido en este trabajo, se considera que *la recuperación de la entropía original de Clausius coadyuvaría a aclarar la confusión del concepto.*

## **6.2 Vertiente Educativa. Los Difusores**

### 6.2.1 Libros de texto

En términos generales, establecemos que los autores de libros de texto apelan fundamentalmente al desarrollo lógico-racional de los contenidos disciplinarios.

Este desarrollo no hace concesiones históricas ni ofrece facilidades al lector para la comprensión de los contenidos complejos.

Efectivamente, pensando en la matriz disciplinaria de Kuhn para la termodinámica, la presentación de la misma en los libros de texto se centra principalmente en el desenvolvimiento de los componentes correspondientes a las “Generalizaciones simbólicas” y a los problemas “Ejemplares” (componentes A y D de la matriz), y se deja de lado la mención y ubicación explícita de los componentes relacionados con los compromisos y los valores.

De esta manera, sin un conocimiento y reconocimiento completo del paradigma en estudio por parte de los “adherentes potenciales”, -lectores de los libros de texto de termodinámica-, difícilmente se conseguirá, no ya la adhesión al paradigma por parte del estudiante que se aproxima al campo, sino el objetivo más modesto de mantener su interés.

Se constata que la definición macroscópica de la entropía de Clausius aparece en todos los libros de termodinámica revisados y no ha sufrido cambio alguno, mientras que, la expresión original y su significación física no aparece en ninguno de ellos.

Por ello, ante la carencia de una orientación clara del significado físico para la entropía, los difusores relevan -conforme sus creencias y preferencias- alguna de las características del concepto, atribuyéndole un carácter definitorio; con el consecuente impacto de una interpretación-comprensión incompleta del concepto por parte de los lectores poco informados.

Una implicación de la pérdida de la expresión original de Clausius, es la carencia de claridad y precisión en el significado físico de la entropía. Esta carencia ha propiciado la multisignificación del concepto y la irrupción de otras disciplinas en el debate de su significado.

### 6.2.2 Profesores

La definición clásica de Clausius para la entropía, es la que predomina en el proceso de enseñanza y en la concepción que los profesores entrevistados suelen manejar con sus alumnos aunque, el modelo microscópico de Boltzmann también aparece en algunos profesores.

Después de este trabajo, queda claro que el aspecto histórico juega un papel poco relevante en la enseñanza y sólo es tomado en cuenta en la presentación del concepto.

Sin sorpresa, encontramos que los profesores siguen en la presentación de la entropía un patrón de desarrollo similar al de los libros de texto que les sirven de base, y derivan de ellos la actitud predominante en su enseñanza: la histórico-fenomenológica-empírica, basada en el concepto de equilibrio como la que sigue el texto de Zemansky (1968), y que proviene del trabajo de Planck (1907), así como la formal-teórica que sigue la obra de Callen (1985) y que tiene sus raíces en el libro de Maxwell (1904).

En general, puede afirmarse que la enseñanza de la termodinámica y particularmente la enseñanza de la entropía, derivada de los libros de texto que utilizan los profesores, está poco reflexionada y poco analizada con relación a las bondades didácticas de los textos y la postura asumida por sus autores.

Destacamos que en el Siglo XIX, aparecen diferencias de interpretación y de enfoque hacia la termodinámica que se relacionan con la selección de los hechos importantes a ser estudiados y el acercamiento hacia ellos. Planck (1907) parte de los fenómenos y asienta su trabajo sobre una amplia base empírica. Así, el significado de la entropía debe ser encontrado en la observación de la direccionalidad intrínseca de los fenómenos naturales. Se busca el significado de los términos abstractos en términos de observables, en acuerdo explícito con el positivismo lógico. Por su lado la postura de Maxwell (1904) -basada en la teoría dinámica del calor, que es asumida por Callen (1985)- descansa en el estudio dinámico de los procesos y en la búsqueda de correspondencia entre los hechos conocidos y la estructura abstracta de la teoría, concordando con el empirismo lógico -versión moderada del positivismo lógico- que acepta que las leyes científicas son reglas que permiten extraer inferencias de unos enunciados observacionales a otros enunciados observacionales.

Resulta de interés resaltar que en Clausius se reconocen ambas aproximaciones en los diferentes momentos del desarrollo de su trabajo. La actitud fenomenológica se apoya en las observaciones de los fenómenos térmicos cotidianos, en el estudio de los trabajos de Carnot y otros, para plantear su segundo principio y posteriormente el concepto de entropía. Y después, Clausius asume la segunda postura, en la construcción de la expresión matemática original de la entropía, pues se aproxima a los procesos de intercambio térmico con un marco teórico prefigurado basado en sus estudios anteriores, sus supuestos molecularistas y la concepción del calor como movimiento de partículas.

La identificación de 5 definiciones y 7 representaciones físicas para la entropía, enunciadas explícitamente por los 12 profesores de la muestra entrevistada, y estudiadas en el Capítulo 5, constituye una prueba de la dispersión nocional y representacional que rodea a ese concepto; lo cual también sucede en el campo de la práctica docente.

Estos resultados permiten concluir que:

- *No existe una representación física o definición única y consensuada para la entropía.* El desarrollo de Clausius tal como es presentado por los libros de texto no logra impactar a los profesores, al punto que sea adoptado por todos ellos

- El que los profesores contesten que la definición para la entropía es “como la de Clausius” hace suponer que se adopta la expresión:  $\Delta S = \int dQ_{\text{rev}}/T$  misma que, sin el contexto histórico que le dio origen, sólo posee significado matemático.

Los profesores que responden que la definición que manejan es “a partir de Boltzmann”, y que asumen una representación microscópica para la entropía, manifiestan con ello insatisfacción con la definición matemática de Clausius y su necesidad de “salirse del campo macroscópico” para definir la entropía.

Mantenemos la consideración de que la expresión mixta original de Clausius resuelve esa insatisfacción.

### 6.2.3 Enseñanza

Con relación a la propuesta de enseñanza, el reconocimiento de la multirrepresentacionalidad conceptual en los sujetos, es consustancial en una propuesta de enseñanza para la entropía que busca la comprensión del concepto a partir de la “autoconciencia representacional” para la entropía, de su explicitación y del análisis de sus potencialidades y límites contextuales-explicativos.

Los perfiles epistemológicos de Bachelard, el conceptual de Mortimer, y la matriz disciplinaria de Kuhn con los contenidos de sus cuatro componentes, constituyen los elementos esenciales de la propuesta de enseñanza que se ejemplifica para la entropía, en la que el conocimiento y uso de la entropía original de Clausius constituye el eje central.

Si se toman como punto de partida los resultados del análisis de los libros de texto, las definiciones y representaciones de los profesores sobre el concepto de entropía, se puede afirmar que:

- Dentro de la termodinámica clásica, tal como ha sido desarrollada por los continuadores, difundida por los autores de texto y transmitida por los propios profesores entrevistados, la entropía no tiene más definición que la conocida expresión de Clausius:  $\Delta S = \int dQ_{\text{rev}}/T$ .

- La necesidad de “salirse del campo macroscópico” para definir la entropía, permite concluir que la búsqueda de inteligibilidad para la entropía queda insatisfecha con la expresión incompleta que ha persistido de la propuesta integral inicial de Clausius para la entropía.

- La gama de 7 representaciones para la entropía que surgen en una muestra de 12 profesores, remite a entender que la búsqueda de inteligibilidad del concepto se da a través del resaltamiento de alguno de los rasgos que los libros de texto han destacado y que los profesores, al plantearlo como respuesta, han “*significado perceptualmente*” y conceptualizado como el más representativo para la entropía.

- Existen representaciones múltiples para la entropía en cada profesor, que cohabitan sin que se generen contradicciones entre ellas, porque cada representación es dependiente de un contexto particular y es en ese contexto en el que la representación es utilizada.

Las conclusiones anteriores dan cuenta de los aspectos más relevantes desprendidos de la presente investigación.

Enseguida se enuncian los hallazgos que consideramos más significativos de este trabajo.

### 6.3 Hallazgos

- La confirmación y re-descubrimiento del planteamiento original mixto de Clausius para la entropía.

- La significación física otorgada por Clausius a la entropía a través de las transformaciones de primera, segunda y tercera especie.
- El importante papel que jugó la controversia entre Maxwell (Harman, 1962) con Clausius y sus consecuencias.
- La necesidad de salirse del campo de la termodinámica para la interpretación física de la entropía.
- La aclaración de la definición de la entropía ligada al desorden.
- La multirrepresentación del concepto.
- La coexistencia de múltiples representaciones para la entropía en los sujetos.

## 6.4 Preguntas y respuestas

No es posible terminar este trabajo sin dar una respuesta puntual y breve -la respuesta extensa es todo el documento- a las interrogantes que inspiradas en el trabajo de Brosseau y Viard (1992), se plantearon en el Capítulo 1 (p.5), y dieron pauta para la construcción del problema de esta investigación.

## Preguntas

### Preguntas

- \*1 ¿Por qué el desarrollo más completo de Clausius se reduce a la localización de un conjunto de objetos en el espacio?
- \*2 ¿Por qué se construye el concepto de entropía sobre una base diferente a la original de Clausius?
- \*3 ¿Cómo es que evoluciona el concepto de entropía desde Clausius a nuestros días?
- \*4 ¿Por qué los alumnos conceptúan a la entropía como equivalente al desorden molecular?
- \*5 ¿Por qué predomina la conceptualización del alumno por sobre la aplicación de la fórmula matemática conocida?
- \*6 ¿Por qué pudiera darse la incompreensión del proceso a preguntar?

## Respuestas

- Pregunta 1. Clausius construye el significado físico para la entropía a partir de la asunción y visualización “de la materia” como constituida por partículas, con base en el Principio de equivalencia de las transformaciones, y mediante la introducción del concepto de “disgregación”. A partir de ello define las transformaciones de 2ª y 3ª especie relacionadas con la energía cinética (velocidad de las partículas-temperatura) y con la configuración (estado de agregación-volumen) respectivamente. La poca claridad con la que se presentan al alumno estas relaciones y un desarrollo incompleto de la idea de Clausius, da lugar a que la entropía se signifique físicamente fuera de Clausius y sólo con base en la noción de desorden con su configuración espacial, es decir con el volumen que ocupan y con la localización de un conjunto de partículas (objetos en el espacio)
- Pregunta 2. La construcción del concepto de entropía por parte de los alumnos sobre una base diferente a la de Clausius se ha explicado ya a través de la respuesta anterior. Sin embargo, puede añadirse para enfatizar la tesis que se defiende: que los alumnos consideran indispensable “fugarse” del campo macroscópico clausiano, presente en sus libros, hacia la visión microscópica boltzmanniana, presente también en sus textos, porque desde ella pueden construir una significación física intuitiva para la entropía a partir del desorden.
- Pregunta 3. La definición macroscópica de la entropía de Clausius ha persistido en sus términos originales y, como tal, aparece en todos los libros de termodinámica revisados. Esta expresión no ha sufrido cambio alguno en el transcurso de los años. La expresión original y su significación física no aparece en ningún texto.
- Pregunta 4. Los alumnos conceptúan a la entropía sólo como equivalente al desorden molecular, porque la significación física de la entropía, ausente en la presentación clausiana en los libros de texto, la encuentran a partir de una “percepción significada” construida alrededor de la noción familiar de desorden vinculada al aumento del volumen.

- Pregunta 5. La significación del alumno construida alrededor de la noción de desorden predomina por sobre la fórmula  $S = dQ/T$ , porque, se ha reiterado, la fórmula conocida de Clausius sin su significado físico no permite una percepción significada. Se “*ve que*” (la fórmula) pero no se “*ve como*” ligada a un cambio, ni se ve ligada a la noción de transformación
- Pregunta 6 Se mencionó en el Capítulo 1 que la incomprensión del proceso de expansión adiabática al que alude la pregunta de Brosseau y Viard, no podía darse con los alumnos de la muestra, porque todos eran estudiantes de posgrado en física. No obstante, la incomprensión del proceso ocurrirá en otros niveles educativos, cuando no pueda entenderse una expansión volumétrica ante la ausencia de calor que la provoque. La entropía vista como “transformaciones de primera, segunda y tercera especie, ofrece un referente físico cercano relacionado con la noción de cambio” que posibilita la comprensión-explicación del fenómeno

### 6.5 Definiciones para la entropía.

Para concluir con la conveniencia didáctica de recuperar la expresión de Clausius, planteamos enseguida como enunciados, algunas de las definiciones aceptadas para la entropía:

De acuerdo a Callen

- La entropía entra de manera abstracta como una función variacional en un principio matemático extremo que determina los estados de equilibrio. Su significado físico se obtiene a través de la mecánica estadística.

Fuera de la termodinámica y siguiendo a Boltzmann:

- La entropía es el logaritmo del número de microestados entre los cuales el sistema sufre transiciones y los cuales comparten la misma probabilidad de ocupación.

Está de más llamar la atención acerca de los conocimientos matemáticos que un alumno debe poseer para comprender, ya no el concepto del que se habla, sino los términos en los que se expresan las definiciones.

En palabras más cercanas al lenguaje cotidiano, dentro de la termodinámica clásica, García-Colín propone como definiciones:

- La entropía es una medida de las restricciones de un sistema.
- La entropía es la medida de la desorganización de un sistema.

Debe enfatizarse que en sentido estricto, las restricciones no son la entropía, y que, tampoco con Clausius, la entropía es la energía consumida ni por consumir, ni es la o las transformaciones realizadas. En todas las definiciones de entropía proporcionadas, la entropía es un indicador, una estimación, una medida que no debe confundirse con lo indicado, con lo estimado, con lo medido.

Según la termodinámica, a partir de Clausius, y aceptando literalmente su definición: ***“la entropía es la suma del valor de transformación del contenido de calor (Y) y del valor de transformación del arreglo actual de las partículas (Z). La entropía es el contenido de transformación de un cuerpo.”***

Si se mantiene la analogía con la energía que siguió el propio Clausius, la entropía puede entenderse **como la capacidad que tiene un cuerpo para seguir sufriendo transformaciones.**

La entropía es un concepto que en sí mismo aporta información sobre la energía del sistema, no solo con referencia a su estado actual, sino con relación a su historia (transformaciones sufridas, energía consumida), y a su futuro potencial (capacidad para seguirse transformando, energía disponible).

Esta multiplicidad informativa -que además permite definir la direccionalidad de las transformaciones espontáneas hacia la máxima entropía- aunada a la connotación temporal que puede ser desprendida de lo anterior, le otorgan a la entropía una singularidad especial que ha dado origen a la polisemia y confusión que rodea al término.

Nos sentiremos satisfechos si este trabajo coadyuva a disminuir esa confusión.

## 6.6 Conclusión General

La finalización de un trabajo como el desarrollado hace que se aprecie el gran esfuerzo que implica, para los individuos y las colectividades, la construcción de paradigmas, matrices o tramas disciplinarias.

En la vertiente educativa, el proceso de maduración paradigmática kuhniana, nunca llega a recorrerse del todo en el transcurso de la enseñanza de una disciplina. Las etapas de maduración, como ocurre con las representaciones, no se suceden sino que coexisten en cada texto y en la cotidianeidad de cada aula en una re-construcción interminable.

En este sentido, la historia en la educación no está, ni es, “el pasado”; está inmersa en las disciplinas y, en el aula, está presente y vigente.

Expresamos el deseo de que se reconozca la importancia de la historia de las disciplinas y, en particular, *la historia de los conceptos científicos*, para que trabajos como el actual se multipliquen en favor de la enseñanza de la ciencia.

## 6.7 Sugerencias para la continuación de este estudio

### 6.7.1 Para el concepto de entropía

El seguimiento de los estudios de Gibbs con relación a la entropía y el papel de este concepto en las ecuaciones de Maxwell, son aspectos de la termodinámica que, desde el concepto de entropía, podrían constituir la continuación de este trabajo.

Por otro lado, vale la pena subrayar de nueva cuenta, que este trabajo se ha desarrollado dentro de la termodinámica de equilibrio, en la que el tiempo no juega ningún papel. Por lo mismo, la consideración de problemas que involucran al tiempo son importantes en la práctica, y es en estos problemas, que involucran estados fuera del equilibrio, donde la

segunda ley de la termodinámica y la entropía, tienen también una destacada importancia, como se explica a continuación.

Citando a Jou, Casas-Vázquez y Lebon (1993), fue reconocido por Meixner (1943) que la termodinámica de los estados de no equilibrio tiene muchas versiones y aunque así ha sido, según estos autores, han persistido fundamentalmente tres: la llamada *teoría clásica de los procesos irreversibles* propuesta por Ossanger en 1930, y desarrollada posteriormente por Prigogine (1961) y otros. Esta teoría está basada en la hipótesis de equilibrio local que dice que “no muy lejos del equilibrio” el sistema depende, local e instantáneamente, de las mismas variables de las que depende en el estado de equilibrio. Esta aproximación fue generalizada por Kestin y Bataille (1975, 1979), quienes introdujeron la noción de un estado de equilibrio acompañante.

A la segunda teoría se le da el nombre de *termodinámica racional*, de la cual, Truesdell (1969) es uno de sus más destacados representantes. Se caracteriza por su rigor matemático y aunque ha despertado interés y tenido cierto éxito, el insuficiente énfasis en los fundamentos físicos de sus conceptos básicos, ha restringido su expansión.

La tercera teoría ha surgido en las últimas cinco décadas y es conocida como *termodinámica irreversible extendida*; esta versión ha recibido impulso debido a Lebon *et al* (1988,1992), García-Colín (1988, 1991) y otros. La termodinámica irreversible extendida, nació de la necesidad de construir un formalismo que fuera más allá de la hipótesis del equilibrio local. Como características principales, presenta un soporte físico más amplio y un desarrollo menos formal que el de la termodinámica racional.

Todas las versiones de la termodinámica de no equilibrio enfrentan los mismos problemas y tratan de contestar las mismas preguntas, por ejemplo: ¿cuál es la temperatura de no equilibrio? y ¿cómo se define la entropía de no equilibrio?

De lo expuesto, es claro que un punto natural de continuación de este trabajo será hacer el seguimiento de la evolución de la entropía con relación a todas estas versiones o centrarse en alguna de ellas.

### 6.7.2 Para La Enseñanza

La organización didáctica de cualquier disciplina puede beneficiarse al sacar a la luz la historia real de las teorías y conceptos que la constituyen, para esclarecer los esquemas de conocimiento implícito que a menudo subyacen en la introducción de términos, definiciones, ilustraciones y en el significado propuesto para, una vez hecho ese ejercicio, confrontar la información obtenida con la información de manejo habitual.

La realización previa a la enseñanza de un análisis didáctico por parte de los profesores parece necesaria. Sobre todo si -siguiendo a Tarsitani y Vicentini (1991)- el análisis didáctico de un campo de conocimiento, tiene que interpretarse y traducir al contexto del aula elementos del lenguaje científico creado a su vez en contextos particulares, sujetos a arreglos continuos y lleno de implicaciones metafóricas a menudo ambiguamente establecidas. Al hacer esto, se tiene que tratar con esquemas de conocimiento de los científicos, los cuales están también sujetos a la evolución histórica.

Creemos que el conocimiento de la historia de la ciencia y de la disciplina en particular es útil dentro del análisis didáctico que el profesor realiza en la planeación e inicio de sus actividades en el aula, en la conciencia de que tiene que familiarizarse con los esquemas de conocimiento y la matriz disciplinaria que los científicos fueron creando y proponiendo, junto con las analogías, metáforas y modelos que usaron en el esfuerzo de comunicar su pensamiento.

Aún existen problemas concernientes a la didáctica de la termodinámica provenientes de las ambigüedades debidas al propio desenvolvimiento histórico de la disciplina. Algunos son tan antiguos como la diferencia entre calor y temperatura o la distinción entre procesos reversibles e irreversibles.

La definición de las estrategias didácticas más adecuadas para la comprensión, construcción-apropiación y aplicación exitosa de los conceptos matemáticos que rodean a la entropía, como son las nociones de función de estado y diferencial inexacta, es todavía un asunto pendiente.

El desarrollo de la termodinámica de los procesos irreversibles, está generando otros problemas didácticos con relación a los conceptos tradicionales, incluyendo a la entropía, que podrán ser atendidos de una manera análoga a la que se ha propuesto en esta investigación.

Una continuación natural de este trabajo es el planteamiento de investigaciones que busquen profundizar la comprensión del concepto de entropía en los alumnos, a través del desarrollo de estrategias didácticas específicas en los términos que aquí se han planteado.

Otra línea de investigación para ser desarrollada, es seguir profundizando en la indagación de cómo otros puntos de vista -como los que se derivan de la filosofía, de la historia y de otros campos- contribuyen a la comprensión del concepto de entropía

De esta manera, con el apoyo de la historia, la filosofía y la psicología, la investigación educativa y la didáctica pueden converger en una forma de interacción más fundamental para la comprensión de la construcción del conocimiento científico, su permanencia o cambio, la multirrepresentacionalidad y la comprensión conceptual.

Este trabajo es un esfuerzo en esa dirección.

## REFERENCIAS

- Abbott, M. y Vanness, H. (1991). *Termodinámica*. Mc Graw Hill. México.
- Abd-El-Khalick, F. y Akerson, V. (2003). Learning as Conceptual Change: Factors mediating the Development of Preservice Elementary Teachers' Views of Nature of Science. *Science Education*, 88, 785-810.
- Álvarez-Gayou, J. L. (2003). *Cómo hacer investigación educativa. Fundamentos y metodología*. Paidós. México.
- Alvarenga, M. (1976). *Física General*. Harla. México.
- Ausubel, D.P. (1982). *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. Trillas. México.
- Ayer, A. J. (1981). *El Positivismo Lógico en México*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Bachelard, G. (1993). *La filosofía del no. Ensayo de una filosofía del nuevo espíritu científico*. Amorrortu. Buenos Aires.
- Badger, P. (1967). *Equilibrium Thermodynamics*. Allyn and Bacon. USA.
- Barón, M. (1989). With Clausius from Energy to Entropy. *Journal of Chemical Education*, 66(12), 1001-1004.
- Berstein, B. (1960). Proof of Carathéodory Local Theorem and its Global Application to thermostatics. *Journal of Mathematical Physics*, 1, 222-224.
- Bigge, M. (1975). *Teorías de aprendizaje para maestros*. Editorial Trillas. México.
- Boltzman, L. (1964). *Lectures on Gas Theory*. University of California Press.

- Bonilla, X. (2003). *Concepciones epistemológicas de aprendizaje y evaluación de los docentes de Ciencias Naturales, de la Escuela Normal Superior de México*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Pedagógica Nacional. Unidad Ajusco, México.
- Bridgman, P. (1941). *The Nature of Thermodynamics*. Harvard University Press (citado por Uffink, 2001).
- Bryan, G. (1891). Report of a Comitee, Consisting of Messrs J. Larmornand & G.H. Bryan, on the Present State of our Knowledge of Thermodynamics, Especially With Regard to the Second Law. *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 61, 85-122 (citado por Uffink, 2001).
- Brosseau, C. y Viard, J. (1992) Quelques Reflexions sur le concept d'entropie issues d'enseignement de thermodynamique. *Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), 13-16.
- Brown, H. (1972). Perception and Meaning. *American Philosophical Quaterly Monograph*, 6.
- Brown, H. (1998). *La nueva filosofía de la ciencia*. Tecnos.Madrid
- Campanario, J. M. y Moya, A. (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las Ciencias*, 17, 179-192.
- Campbell, N. (1920). *Physics: The elements* (reimpreso como *Foundations of Science*, 1957). Dover. New York.
- Callen, H. (1985). *Thermodynamics and an introduction to Thermostatistics*. J. Wiley and Sons. New York.
- Canales, M. (1999). *Fisicoquímica. Vol 1 (Teoría)*. UNAM Iztacala. México
- Caravita, S. y Halldén, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 89-111.

- Carathéodory, C. (1909). Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik. *Mathematische Annalen* 67, 335-386. (existe la traducción al inglés por J. Kestin en Kestin (Ed.) 1976), 229-256.
- Carnap, R. (1936). *Testability and Meaning: Philosophy of Science* 3. University of Wiscconsin.
- Castelán, G. (1982). *Problemas Resueltos*. Fondo Educativo Interamericano. México.
- Clausius, R. (1991). *Théorie Mécanique de la Chaleur. (Ed. Original, 1868)*. Eugene Lacroix. Paris
- Callendar, H. (1911). The Caloric Theory of Heat and Carnot's principle. *Proceedings of the Physical Society of London*, 23, 153-189.
- Chang, R. (1977). *Physical Chemistry with Applications to Biological Systems*. McMillan, Publishing Co. USA.
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual Change within an across Ontological Categories: Examples from learning and Discovery in Science. En Giere, R. (Ed.). *Cognitive Models of Science*, Vol. XV, Minnesota Studies in the Philosophy of Science. University of Minnesota Press. 129-186
- Chue, S. H. (1977). *Thermodynamics. A Rigorous Postulatory Approach*. J. Wiley and Sons. New York.
- Díaz Peña, M. (1979). *Termodinámica y Mecánica Estadística*. Tomo I. Alambra. Madrid.
- Drago, A. (1994). Mach's Thesis: Thermodynamics as the basic theory for Physics Teaching. *Science and Education*, 3, 189-198.

- Duit, R. (1995). The Constructivist View: A fashionable and fruitful Paradigm for Science Education Research and Practice. En Steffe, L. P. and Gale, J. *Constructivism in Education*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.
- Duit, R., Gropengießer, H. and Kattmann, U. (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction. En H.E. Fischer (Eds.) *Developing standards in research on science education*, London: Taylor and Francis, 1-9. (citado por Duit, 2006).
- Duit, R. (2006). La Investigación sobre Enseñanza de las Ciencias. En *Revista Mexicana de Investigación Educativa*. 11(30), 741-770.
- Duschl, R. A. & Gitomer, D. H. (1991). Epistemological Perspectives on Conceptual Change: Implications for Educational Practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 839-858.
- Epstein, P. (1957). *Textbook of Thermodynamics*. J. Wiley and Sons. USA.
- Ernest, P. (1995). The One and the Many. En Steffe, L. P. & Gale, J. *Constructivism in Education*. Lawrence Erlbaum Associates. 459-486.
- Fast, J. D. (1979). *Entropy*. McMillan. USA.
- Fermi, E. (1956). *Thermodynamics*. Dover. New York.
- Feyerabend, P. (1970). *Tratado contra el método*. Tecnos. México
- Feynman, R. y Leighton, R. (1987). *Física. Vol 1*. Addison-Wesley. USA.
- Flores F. y Gallegos L. (1998). Partial Possible Models: An Approach to Interpret Students' Physical Representation. *Science Education*, 82, 15-29.

- Flores F. (1999). *Estructura y Procesos de Inferencia en las ideas físicas de los estudiantes: Modelos Semiformalizados sobre ideas previas*. Tesis de Doctorado no publicada. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Flores C., F., López, M. A., Gallegos C., L. and Barojas J. (2000). Transforming science and Learning concepts of physics Teachers. *International Journal of Science Education*, 22(2), 197-208.
- Flores, F. y Aguirre, M. E. (2003). *Educación en Física. Incursiones en su investigación*. UNAM-Plaza y Valdés. México
- Flores, F. (2004). El cambio conceptual: interpretaciones, transformaciones y perspectives. *Educación Química*, 15 (3), 256-269
- Fuchs, H. (1987). Entropy in the teaching of introductory Thermodynamics. *American Journal of Physics*, 55(3), 215-219.
- Gallegos, L. (2002). *Comparaciones entre la evolución de los conceptos y las ideas de los estudiantes: El modelo de la estructura de la materia*. Tesis Doctoral no publicada Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- García-Colín, L. (1972). *Introducción a la Termodinámica Clásica*. Trillas. México
- García-Colín, L. (1988). Extended non equilibrium Thermodynamics. Scope and Limitations *Revista Mexicana de Física*, 34, 344-366 (citado en Jou, 1993).
- García-Colín, L. y Uribe, F. J. (1991). Extended Irreversible Thermodynamics. Beyond the Linear Regime: A Critical Overview. Review Article. *Journal of Non Equilibrium Thermodynamics*, 16(8) (citado en Jou, 1993).
- García-Colín, L. (2000). *De la máquina de vapor al cero absoluto. (Calor y entropía)*. Col. *La ciencia para todos*. Fondo de Cultura Económica. México.

- García-Colín, L. (s.f.) *Las leyes de la Termodinámica*. El Colegio Nacional. México.
- García-Colín, L. (2002). *Y sin embargo se mueven... Teoría cinética de la materia*. Col. *La ciencia para todos*. Fondo de Cultura Económica. México
- García-Colín, L. (s.f.) *Entropía*. El Colegio Nacional. México
- Gibbs, J. W. (1961). Graphical Methods in the Thermodynamics of Fluids. En *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs I*. Dover. New York.
- Gibbs, J. W. (1961). A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamics Properties of substances by means of surfaces. En *The Scientific Papers of Willard Gibbs I*. Dover. New York
- Gibbs, J. W. (1961). On the Equilibrium of Heterogeneous Substances. En *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs I*. Dover. New York.
- Gil, D. (1993). Contribución de la historia y de la filosofía de la ciencia al desarrollo de un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*. 9(1), 69-77.
- Gimeno S., J. y Pérez Gómez, A. I. (1985). *La Enseñanza su Teoría y su Práctica*. Akal. España
- Gimeno S., J. y Pérez Gómez, A. I. (1993). *Comprender y Transformar la enseñanza*. Morata. España.
- Glasson, G. and Bently M. (2000). Epistemological undocuments in scientists' reporting of research to teachers. *Science Education*, 84, 469-485.
- Glaserfeld, E. von (1989). Cognition, construction of knowledge and teaching. *Sinthese*, 80, 121-140.

- Glaserfeld, E. von. (1995). A Constructivist Approach to Teaching. En Steffe, L. P. and Gale, J. *Constructivism in Education*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale, New Jersey. 3-15.
- Gómez-Granell, C. y Coll, C. (1994). ¿De qué hablamos cuando hablamos de constructivismo? *Cuadernos de Pedagogía*, 221, 8-10.
- Gyftopowlos, E. (1991). *Thermodynamics, Foundation and Applications*. Mc.Millan. USA.
- Hanson, N. R. (1977). *Patrones de descubrimiento*. Alianza Editorial. Madrid.
- Harman, P. H. (1962). *Energy, Force and Matter. The Conceptual Development of Nineteen Century Physics*. Cambridge History of Science Series. London.
- Hashweh, M. (1996). Effects of Science Teachers' Epistemological beliefs in Teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(1), 47-63.
- Hempel, C. (1966). *Philosophy of Natural Science*. Prentice Hall. USA.
- Hewitt, P. (1995). *Física Conceptual*. Addison- Wesley. USA.
- Hewson, P. and Hewson, M. (1984). The role of conceptual conflicts in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Hewson, P. W. y Beeth, M. E. (1995). Enseñanza para un cambio conceptual: Ejemplos de fuerza y movimiento. *Enseñanza de las Ciencias*. 13. 25-35.
- Hewson, P. and Hewson, M. (2003). Effect of instruction using student's prior knowledge and conceptual change strategies on Science Learning. *Journal of Research in Science Teaching. Supplement*, 586-598.

- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*. 14 (5), 541-562.
- Hume, D. (1967). *Investigación sobre el conocimiento humano*. Alianza . Madrid
- Jou, D., Casas-Vázquez, J. & Lebon, G. (1993). Non equilibrium entropy and the Second Law of Thermodynamics: A Simple Illustration. *International Journal of Thermophysics*, 14(4), 671-685.
- Kestin, J. and Bataille, J. (1975). *J. Mecan.*, 14, 365 (según cita de Jou, 1993).
- Kestin, J. and Bataille, J. (1979). Thermal effects in laminar incompressible viscous and unsteady plane stagnation flows. *Non-Equilibrium. Thermodynamics*. 4, 229. 31-46.
- Khun, T. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Kinchin, A. I. (1957). *Mathematical Foundations of Information Theory*. Dover. New York.
- Koulaidis, V. and J. Ogborn (1995). Science teachers' philosophical assumptions. How well do we understand them? *International Journal of Education*, 17(3), 273-283.
- Lebon, G., Jou, D. & Casas-Vázquez, J. (1980). An extension of the local equilibrium hypothesis. *Journal Physics*, 13, 275-290 (citado por Jou, 1993).
- Lebon, G. Jou, D. & Casas-Vázquez, J. (1992). Questions and answers about a thermodynamic theory of the third type. *Contemp. Physics*, 33, 41-51 (citado por Jou, 1993).
- Leslie, S. and Gale, J. (1995). *Constructions in Education*. Lawrence Earlbauer Associates, Publishers. Hillsdale, New Jersey.

- Levine, I. (1988). *Physical Chemistry*. Mc.Graw Hill. USA
- Lewis, E. L. and Linn, M. C. (1994). Heat Energy and Temperature concepts of adolescents, Adults, and Experts: Implications for Curricular Improvements. *Journal of Research in Science Teaching. Suplemento, 40*, 155-175.
- Lieb, E. and Yngvason, J. (1999). The Physics and Mathematics of the Second Law of Thermodynamics. *Physics Reports, 310*, 1-96.
- Linn, M. and Batler Songer, N. (1991). Teaching Thermodynamics to middle School Students: What are appropriate Cognitive Demands? *Journal of Research in Science Teaching, 28(10)*, 885-918.
- López, A., Flores, F. y Gallegos, L. (2000). La formación de docentes en física para el bachillerato. Reporte y reflexión sobre un caso. *Revista Mexicana de Investigación Educativa, 5 (9)*, 113-135.
- López, A. y Flores, F. (2003). Propuesta de modelo didáctico articulado de transformación conceptual. En Flores, F. y Aguirre, M. E. (Coords.) *Educación en Física. Incursiones en su investigación*. UNAM-Plaza y Valdez. México
- López, A. (2006). Educación en ciencias naturales. En *Revista Mexicana de Investigación Educativa. 11(30)*, 721-739.
- Loose, J. (1997). *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*. Alianza Editorial. Madrid.
- Loving, C. C. (1991). The Scientific Theory Profile: A Philosophy of Science Model for Science Teachers. *Journal of Research in Science Teaching, 28(9)*, 823-838.
- Martinás, K., Rapolyi, L. and Szegedi, P. (1990). *Thermodynamics. History and Philosophy*. World Scientific.

- Martínez, M. A. (1998). Once semestres de aplicación del cuestionario de Moreira-Axt a estudiantes de Termodinámica de la carrera de Física. *Revista Mexicana de Física*, 43(4), 397-401.
- Mansoor, Niaz (2000). Gases as Idealized Lattices: A Rational Reconstruction of Students' Understanding of the Behavior of Gases. *Science and Education*, 9, 279-287.
- Marín, N. (1999). Delimitando el campo de aplicación del cambio conceptual. *Enseñanza de la Ciencia*, 17(1), 79-92.
- Marín, N. (1999). Del cambio conceptual a la adquisición de conocimientos. *Enseñanza de la Ciencia*, 17(1), 109-114.
- Marín, N., Solano, I y Jiménez, E. (1999). Tirando el hilo de la madeja constructivista. *Enseñanza de las ciencias*, 17(3), 419-492.
- Martin, B. and Kass, H. (1990). Authentic science: a diversity of meanings. *Science Education*, 74, 541-554.
- Matthews, M. R. (1990). History, philosophy and science teaching: A rapprochement. *Studies in Science Education*, 18, 25-51.
- Matthews, M. R. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de la ciencia: La aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(3), 331-339.
- Maxwell, J. C. (1890). Illustrations of the Dynamical Theory of Gases, reprinted in W. Niven (ed), *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 2 (Cambridge 1890), 377-409. (Citado por Yamalidou, 2001).
- Maxwell, J. C. (1904). *Theory of Heat*. Longmans Green.London

- Meixner, J. (1943). *Ann. Phys*, 43, 244. En Parkus, H. & Dedov, L. I. (1964, Eds). *Irreversible Aspects of continuum Mechanics and Transfer of Physical Characteristics in Moving Fluids*. IUTAM Simposia.
- Meyling, H. (1997). How to change students conception of the epistemology of science. *Science Education*, 6(4), 397-416.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11, 587-596.
- Morris, J. (1982). *Fisicoquímica para biólogos*. Reverté. España
- Mortimer, E. (1995). Conceptual Change or Conceptual Profile Change? *Science and Education*, 4, 267-285.
- Moulines V. (1990). The Classical Spirit in J. Willard Gibbs's Classical Thermodynamics. En Martínás, K., Ropolyi, L. and Szegedi, P. (Eds.) *Thermodynamics: History and Philosophy Facts, Trends, Debates*. World Scientific, 1-12
- Novak, J. (1988). Constructivismo humano. Un consenso emergente. *Enseñanza de la Ciencia*, 6(3), 213-223.
- Novak, J. D. and Gowin, D. B. (1984). *Learning how to learn*. Cambridge. London.
- Onsager, L. (1931). Reciprocal relations in irreversible processes. I. *Physical Review*, 37, 405-426. (citado en Jou, 1993).
- Osborne, J. F. (1996). Beyond Constructivism. *Science and Education*, 80, 53-82.
- Padua, J. (1996). *Técnicas de Investigación Aplicadas a las Ciencias Sociales*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Pérez, R. A. (1999). *Khun y el cambio científico*. Fondo de Cultura Económica. México.

- Piña, E. (1978). *Termodinámica*. Limusa. México.
- Pippard, A. (1981). *Elementos de Termodinámica Clásica*. EASO. México.
- Planck, M. (1945). *Treatise on Thermodynamics*. Dover. New York.
- Popper, K. (1981). *Lógica de la Investigación Científica*. Tecnos. España.
- Porlán, R., Rivero, A. y Martín del Pozo, J. (1997). Conocimiento Profesional y Epistemología de los Profesores I: Teoría, Métodos e Instrumentos. *Enseñanza de la Ciencias, Junio, 15(2)*, 155-171.
- Porlán, R., Rivero, A. y Martín del Pozo, J. (1998). Conocimiento Profesional y Epistemológico de los Profesores II. Estudios, Experiencias y Conclusiones. *Enseñanza de las Ciencias, Junio, 16(2)*.
- Posner, G., Strike, K., Hewson, P. and Gertzog, W. (1982). Accomodation of a scientific conception: Towards a Theory of Conceptual Change. *Science Education, 66(2)*, 211-227.
- Pozo, J. C. (1999). Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la Ciencia como cambio representacional. *Enseñanza de la Ciencia, 17(3)*, 513-520.
- Pozo, J., Gómez, M. and Sanz, A. (1999). When change does not mean replacement, Different representations for conceptual change. En Schuts, S. Vosniadou, A. and Carretero, M. (Eds.). *New Perspectives on Conceptual Change*. Pergamon. London.
- Pozo, J. I. y M. A. Gómez Crespo (2000). *Aprender y Enseñar Ciencia*. Morata. España.
- Prigogine, I. (1961). *Introduction to the Thermodynamics of Irreversible Processes*. Interscience. USA.

- Reif, F. (1964). *Statistical Physics. Vol 5*. Mc Graw Hill. USA.
- Ribeiro, E. y Mortimer, E. (2004). Un perfil conceptual para entropía y espontaneidad: Una caracterización de las formas de pensar y hablar en el aula de Química. *Educación Química, 15(3)*, 218-233.
- Richard, D. and Gitomer, D. (1991). Epistemological Perspectives on Conceptual Change: Implications for Educational Practice. *Journal of Research in Science Teaching, 28(9)*, 839-858.
- Russell, B. (1977). *Los principios de la matemática*. Espasa-Calpe. Madrid.
- Schrödinger, E. (1952). *Statistical Thermodynamics*. Cambridge. U. Press
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communications*. Universidad de Illinois.
- Sichau, Ch. (2000). Practising Helps: Thermodynamics, History, and Experiment. *Science and Education, 9*, 339-393.
- Smith, R. (1952). *The Physical Principles of Thermodynamics. A Treatise for students of Theoretical and Experimental Physics*. Chapman and Hall LTD. London.
- Solomon, J. (1994). The rise and fall of constructivism. *Studies in Science Education, 23*, 1-19.
- Sommerfeld, A. (1956). *Thermodynamics and Statistical Mechanics .Vol. V*. Academic Press. New York.
- Staver, J. (1998). Constructivism: Sound Theory for Explicating the Practice of Science and Science Teaching. *Journal of Research in Science Teaching, 35(5)*, 501-520.
- Sternberg, R. J. (1999). *The Nature of Cognition*. The MIT Press. USA.

- Strike, K. and Posner, G. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. En West, L. & Pines, L. (Eds). *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press. New York
- Taber, K. (2001). Shifting sands: a case study of conceptual development as competition between alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, 23(7), 731-753.
- Tarsitani, C. and Vicentini, M. (1990). History and education in Thermodynamics: comments and problems related to mental representations and semantics. En Martínás, K. Rapolyi L. & Szegedi, P. (1990). *Thermodynamics. History and Philosophy*. World Scientific.
- Tarsitani, C. and Vicentini, M. (1996). Scientific Mental Representations of Thermodynamics. *Science & Education*, 5, 51-68.
- Toulmin, S. (1961). *Foresight and Understanding*. Harper and Row.
- Truesdell, C. (1973). *Termodinámica Racional*. Reverté. España.
- Uffink, F. (2001). Bluff your way in the Second Law of Thermodynamics. *Studies Hist. Phil. Mod. Phys.*, 32(3), 306-358.
- Vosniadou, S. (2002). On the Nature of naïve Physics. En Limón, M. y Mason, L. (Eds). *Reconsidering conceptual change: Issues in Theory and Practice*. Kluwer Academic Publisher. USA.
- Wittgenstein, L. (1961). *Tractatus Lógico-Philosophicus*. Alianza. España.
- Yamalidou, M. (2001). Molecular representations: Building Tentative Links Between the History of Science and the Study of Cognition. *Science and Education*, 10(5), 423-451.
- Zemansky, M. (1968). *Heat and Thermodynamics*. McGraw Hill. New York.

## **ANEXOS**

Anexo 1.1 Historia del Concepto de Entropía.

Rudolph Clausius.

Anexo 4.1 Guía de Entrevistas.

## ANEXO 1.1 HISTORIA DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA

### ORIGEN

#### Desarrollo de Clausius

Frente a la Sociedad de Ciencias Naturales en Zurich el 27 de enero de 1862 Clausius leyó su trabajo titulado “SOBRE LA APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA DE LAS TRANSFORMACIONES AL TRABAJO INTERIOR” que posteriormente fue ubicado como Memorias VI”. En este trabajo expresa matemáticamente el concepto de Entropía (sin llamarlo así todavía) a partir del principio de equivalencia de las transformaciones mencionado en el propio título.

En esta exposición, haremos un relato histórico del nacimiento del concepto de nuestro interés resaltando el razonamiento seguido por Clausius. Para dicho desarrollo, nos remitiremos a las Memorias VI y IX que formaron parte de la obra de Clausius traducida al francés con título “THEORIE MECANIQUE DE LA CHALEUR” Ediciones Jaques Gabay (1868) y Reeditada en 1991.

#### MEMORIA VI (pp. 251-309).

#### Sobre la Aplicación del Principio de la Equivalencia de las Transformaciones para el Trabajo Interior.

De inicio, Clausius menciona el axioma siguiente “el calor no puede pasar de sí mismo de un cuerpo frío a uno más caliente” introducido en una Memoria anterior, y enuncia de inmediato el principio con el que afirma que “el trabajo puede transformarse en calor y recíprocamente”. Este principio lo reconoce como ligado estrechamente con las conclusiones extraídas de los trabajos de Carnot y le nombra *principio de equivalencia de las transformaciones*. Con base en ese principio deduce la desigualdad que lleva su nombre, a partir de las siguientes consideraciones; en todo cambio de estado de un cuerpo, se efectúa en general simultáneamente un trabajo exterior y un trabajo interior; el primero se relaciona con las fuerzas que cuerpos exteriores ejercen sobre el cuerpo considerado; el segundo, a las fuerzas que las moléculas del cuerpo ejercen las unas sobre las otras. Así, cuando un cuerpo efectúa un ciclo cerrado, puede ganar una cierta cantidad de trabajo exterior, pero pierde al mismo tiempo una cierta cantidad de calor; o recíprocamente. Lo anterior lo expresa en general de la siguiente manera: *por medio de un ciclo cerrado se puede transformar el calor en trabajo y el*

*trabajo en calor.* Por otro lado, un ciclo cerrado puede tener también como efecto transportar calor de un cuerpo a otro segundo cuerpo y este segundo cuerpo puede transmitirlo a un tercero, etc. Por el axioma mencionado al principio, el sentido de la transmisión, si es espontánea, será del cuerpo caliente al frío. A esta transmisión de calor, sea en un sentido o en el opuesto, Clausius le llama transformación. Y serán transformaciones equivalentes aquellas que puedan reemplazarse mutuamente. Si se buscan las expresiones matemáticas para estas transformaciones, se tiene que: si una cantidad de calor  $Q$  a la temperatura  $T$  es producida por trabajo, esta transformación tiene el valor de equivalencia

$$Q/T$$

y si la cantidad de calor  $Q$  pasa de un cuerpo de temperatura  $t_1$  a un cuerpo de temperatura  $t_2$ , esta transformación tiene el valor de equivalencia  $Q(1/T_2 - 1/T_1)$ , donde  $T$  es una función de la temperatura que es independiente de la especie de operación por la cual la transformación se efectúa y  $T_1$  y  $T_2$  son los valores de esta función correspondientes a las temperaturas  $t_1$  y  $t_2$ . Clausius plantea que "T no es otra cosa que la temperatura absoluta".

En este punto Clausius hace notar el sentido positivo o negativo de las transformaciones. La transformación ( $Q$  producido por trabajo) está ligada al signo positivo o negativo que  $Q$  tenga en función de la convención propuesta por el propio Clausius de que  $Q$  será positivo si es producido por el trabajo y será negativo si el calor es transformado en trabajo. En la expresión  $Q(1/T_2 - 1/T_1)$ ,  $Q$  puede verse siempre como positivo pues el sentido de la transformación es resultado de la diferencia positiva o negativa del término  $(1/T_2 - 1/T_1)$ . Esto es, la transformación será positiva si el paso de calor se da de una temperatura elevada a una temperatura más baja y será una transformación negativa, si el paso de calor se da de una temperatura baja a una más alta.

Si se representan por estas expresiones las transformaciones que tienen lugar en un ciclo cerrado, se tiene que si el ciclo cerrado es reversible, las transformaciones deben ser en parte positivas y en parte negativas y los valores de equivalencia de las positivas deben tener una suma igual a la que se obtenga con las negativas de tal suerte que la suma algebraica de todos los valores de equivalencia sea nula.

Si el ciclo cerrado no es reversible, los valores de equivalencia de las transformaciones positivas y negativas no deben ser iguales; pero la diferencia sólo podrá darse en un sentido

tal que la suma de los valores de equivalencia positivos sea mayor que la de los negativos. Lo anterior da lugar al principio siguiente: *la suma algebraica de todas las transformaciones que se presentan en un ciclo cerrado sólo puede ser positiva y en el límite sólo puede ser cero.*

Matemáticamente:

$$dQ/T = 0 \quad \text{para un ciclo cerrado reversible, y}$$

$$\int dQ/T \geq 0 \quad \text{en general, para un ciclo cerrado no reversible}$$

esta es la expresión que se conoce como “la desigualdad de Clausius” donde  $dQ$  es el elemento de calor cedido por el cuerpo durante sus modificaciones y  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo al momento en que se cede ese elemento de calor.

En el principio siguiente, Clausius generaliza lo anterior para el *trabajo interior* en términos de una ley general: *en todos los casos donde el calor contenido en un cuerpo efectúe un trabajo mecánico venciendo resistencias, la magnitud de las resistencias que puede vencer es proporcional a la temperatura absoluta.*

## La Disgregación

Para comprender la significación de esta ley Clausius examina los fenómenos por medio de los cuales el calor puede producir trabajo y al respecto, señala que estos fenómenos pueden reducirse a aquellos en los que el calor modifica de una cierta manera el arreglo de las partes constituyentes de un cuerpo, lo que exige que las fuerzas interiores y las exteriores sean superadas. Esto es, la acción del calor tiende siempre a disminuir la cohesión de las moléculas y cuando es superada, *acrecenta sus distancias medias*. Para expresar matemáticamente este hecho, se representa **el grado de división de los cuerpos** por una nueva cantidad que nombra “**disgregación**” de los cuerpos, por medio de la cual se puede definir la acción de calor diciendo que *tiende a aumentar la disgregación*. “Se admitirá como evidente que la producción de trabajo necesita consumir una cantidad correspondiente de calor y recíprocamente, que la consumación de trabajo engendra lo mismo de calor” (pp. 258-259). En suma: el trabajo mecánico que el calor puede efectuar durante una modificación del arreglo de un cuerpo, es proporcional a la temperatura absoluta a la que se opera esta modificación.

## La Cantidad de Calor (H)

Cuando un cuerpo cede calor a otro, el cuerpo que cede calor debe estar a una temperatura más elevada que la del cuerpo que la recibe por tanto, la transmisión de calor entre dos cuerpos a temperaturas diferentes sólo puede tener lugar en un solo sentido. Para buscar la expresión matemática de esta ley, se considerará el caso en el que el cambio sufrido por el cuerpo tiene lugar de una manera reversible (aunque los resultados serán aplicables igualmente para casos no reversibles). Se admitirá que el cuerpo sufre una modificación infinitamente pequeña, que podrá ser ya sea un cambio en la cantidad de calor que contiene o en el arreglo de sus partes constituyentes. A la cantidad de calor que contiene el cuerpo, Clausius la nombra H y dH será la variación de esta cantidad. Sea dL el trabajo (interior o exterior) efectuado por el calor durante la modificación en el arreglo de las partículas; esta cantidad será positiva o negativa, según que la fuerza de calor supere o no a aquellas que se le opongan. Se obtendrá la cantidad de calor consumido por el trabajo, multiplicando dL por el equivalente "A" de calor por unidad de trabajo; esta cantidad será AdL.

La suma dH+AdL es la cantidad de calor que el cuerpo debe recibir de afuera o de otro cuerpo durante su modificación.

Puesto que dQ representa la cantidad de calor infinitamente pequeña que el cuerpo caliente comunica a otro, aquel calor que se le extrae deberá ser representado por  $-dQ$  y consecuentemente  $-dQ=dH+AdL$

$$dQ+dH+AdL=0 \quad (1)$$

Para poder introducir la disgregación en las fórmulas, Clausius hace las consideraciones siguientes: *la disgregación representa el grado de división de los cuerpos* esto es, será más grande en el estado líquido que en el estado sólido y más grande aún en el estado gaseoso que en el líquido. Como el aumento de la disgregación es el medio por el cual el calor efectúa trabajo, la cantidad de trabajo debe estar en una relación determinada con el aumento de la disgregación de tal suerte que a una temperatura dada, el aumento de la disgregación será proporcional a la temperatura absoluta. Sea Z la disgregación del cuerpo, dZ su aumento infinitamente pequeño. De esta manera

$$dL = KTdZ$$

$$\text{o} \quad dZ = dL/KT$$

donde K es una constante que dependerá de las unidades de Z. Si se escoge el valor para K de tal manera que  $K = 1/A$  se tendrá que

$$dZ = AdL/T \quad (2)$$

e integrando a partir de un estado inicial para el cual Z tenga el valor  $Z_0$

$$Z = Z_0 + A \int dL/T \quad (3)$$

Ecuación que determina Z hasta una constante que depende del estado inicial escogido.

Si la temperatura del cuerpo no es la misma en todas sus partes, se puede reunir por suma todos los cambios de disgregación infinitamente pequeños de las diferentes partes o, por integración si el número de las partes es infinito, se obtendrá el cambio de disgregación infinitamente pequeño del cuerpo entero; y la integración dará un cambio de disgregación finito.

Eliminando el elemento de trabajo dL de la ecuación (1) por medio de (2) se tiene que

$$dQ + dH + TdZ = 0 \quad (4)$$

$$\text{y dividiendo por T:} \quad ((dQ + dH)/T) + dZ = 0 \quad (5)$$

Integrando esta ecuación para un cambio de estado finito se tendrá:

$$\int ((dQ + dH)/T) + \int dZ = 0 \quad (I) \text{ que representa el Principio de equivalencia de las Transformaciones}$$

Esta es la expresión matemática buscada por Clausius para “todos los cambios de estado reversibles de un cuerpo”, pero es igualmente válida si en lugar de un solo cambio de estado se considera una serie de cambios consecutivos.

De acuerdo a Clausius, para generalizar el principio de equivalencia de las transformaciones es necesario hacer mención a las especies de transformaciones que pueden efectuarse: 1. la de trabajo en calor, 2. la transmisión de calor entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, y 3. (Se añade una tercera transformación) la del cambio de disgregación de un cuerpo. La transformación será positiva si la disgregación aumenta y negativa si la disgregación disminuye.

Cuando la disgregación de un cuerpo cambia de una manera reversible, este cambio está ligado a una transformación de calor en trabajo o viceversa y se pueden determinar los valores de equivalencia de dos especies de transformación comparando con ellas las que se efectúan simultáneamente. Si se supone primero que se efectúa un cambio determinado del arreglo a temperaturas diferentes, la cantidad de calor que será transformado en trabajo, o producido por trabajo será diferente y proporcional a las temperaturas absolutas. Si se consideran como equivalentes las transformaciones que corresponden a una sola y misma modificación de arreglo será necesario, para determinar los valores de equivalencia de estas transformaciones, dividir la cantidad de calor  $Q$  por las temperaturas absolutas correspondientes. La producción de la cantidad de calor  $Q$  por trabajo, debe tener el valor de equivalencia:  $(Q/T)$  (const), si se efectúa a la temperatura  $T$ . En cuanto al valor de equivalencia para un cambio en la disgregación que se efectúa a temperaturas diferentes, se llegará a una expresión matemática igual a la (3).

En cuanto a las transformaciones de segunda especie, la transmisión de calor sólo tendrá lugar para cambios de estado reversibles, si a una temperatura hay calor transformado en trabajo y a otra temperatura hay trabajo transformado en calor. Esta transformación de segunda especie es por tanto comprendida por medio de transformaciones de primera especie. En general, señala Clausius, “en el establecimiento de las fórmulas matemáticas se puede siempre ver, (como se ha dicho en otra memoria) una transformación de segunda especie, como una combinación de dos transformaciones de primera especie”.

Regresando a la expresión (I), la suma  $dQ+dH$  será, si es positiva, la cantidad de calor producida por el trabajo; si es negativa, será la cantidad de calor transformado en trabajo. Así, la primera integral es el valor de equivalencia de todas las transformaciones de primera especie y la segunda integral representa las transformaciones de tercera especie y toda la ecuación representará todas las transformaciones que sufre un cuerpo. Para cambios de estado reversibles, la suma de todas las transformaciones deberá ser nula. El principio general que se refiere a cambios de estado reversibles se enuncia así:

*Si se toma  $Q/T$  por el valor de equivalencia de la producción de la cantidad de calor  $Q$  a la temperatura absoluta  $T$ , para el trabajo, se puede introducir como segunda transformación correlativa, una cantidad que se relaciona con la modificación del arreglo del cuerpo, y que*

*está completamente determinada por el estado inicial y el estado final del mismo; esta cantidad satisface la condición de que para todo cambio de estado reversible la suma algebraica de las transformaciones es nula.*

Este principio se generaliza aún más para abarcar los cambios no reversibles:

*La suma algebraica de todas las transformaciones que se efectúan en todo cambio de estado sólo puede ser positiva; en el límite, puede ser nula.*

### **MEMORIA IX (pp.377-431).**

#### **Sobre las diversas formas de las ecuaciones fundamentales de la Teoría Mecánica del Calor, que son cómodas en la aplicación.**

Este trabajo, fue dado a conocer por Clausius el 24 de abril de 1865, tres años después de la publicación de su MEMORIA VI y, como él mismo lo expresa, “he creído prestar servicio a los físicos y a los mecánicos partiendo de la forma más general de las ecuaciones fundamentales de la teoría mecánica del calor, para deducir otras formas diversas que se relacionan con las suposiciones especiales y pueden aplicarse inmediatamente a diferentes casos particulares de tal forma que les rinda un uso más cómodo que el que se tiene bajo su forma original”.

En esta Memoria Clausius le da **nombre por primera vez al concepto de entropía** en la Sección o Párrafo 14.

Antes de abordar la sección donde se presenta el concepto de nuestro interés, Clausius hace la siguiente afirmación: “toda la teoría mecánica del calor descansa sobre dos principios, el de la equivalencia entre el calor y el trabajo, y el de la equivalencia de las transformaciones”. Las expresiones matemáticas para estos principios son, para el primer principio, si se supone que un cuerpo cambia de estado y se busca determinar cuál es la cantidad de calor que se le debe comunicar durante este cambio, se representa el calor por  $Q$  y el elemento de calor  $dQ$  corresponderá a un cambio de estado infinitamente pequeño y estará dado por la ecuación ya conocida

$$dQ = dU + AdW \quad (I)$$

donde  $U$  representa la energía del cuerpo (según le ha llamado Thomson),  $Q$  el contenido del calor, y  $AdW$  es el trabajo exterior.

Para el segundo principio la relación es la (I):  $\int (dQ+dH)/T + \int dZ = 0$

particularmente la integral  $\int dQ/T$  debe anularse en ciclos reversibles

por tanto  $dQ/T$  es una diferencial total de una cantidad que solo depende del estado actual del cuerpo y no de la vía por la cual se llegó a él.

En este punto de su exposición Clausius introduce el concepto de entropía “Si representamos esta cantidad por  $S$  tendremos”:

$$dS = dQ/T$$

si se supone la ecuación integrada por una serie de cambios reversibles, por los cuales el cuerpo pasa del estado inicial al estado actual, y se designa por  $S_0$  el valor de  $S$  para el estado inicial:

$$S = S_0 + \int dQ/T$$

La ecuación fundamental (I) que se aplica a todos los estados reversibles de un cuerpo, se escribe como:

$$\int dQ/T = \int dH/T + \int dZ$$

Las dos integrales del segundo miembro son los valores relativos a dos cantidades ya conocidas introducidas en la Memoria VI. La primera de esas integrales  $H$  representa la cantidad de calor realmente existente en el cuerpo y sólo depende de la temperatura y no del arreglo de sus partículas. Resultando que la expresión  $dH/T$  es una diferencial total y que tomando la integral desde un estado inicial dado hasta el estado actual, se obtiene una cantidad que estará completamente determinada por el estado actual, sin que se tenga necesidad de conocer la manera como se efectuó el pasaje de un estado a otro. A esta cantidad Clausius la nombra como “el valor de transformación del calor existente en el cuerpo, contado a partir de un estado inicial dado” por lo que –aclara- este valor no representa el valor de transformación de todo el calor contenido en el cuerpo sino sólo del calor contenido entre el estado actual y el inicial.

De esta manera a esta integral la nombra “**el valor de transformación de calor**” de un cuerpo contado a partir de un estado inicial dado. Se la representa por  $Y$ . Mientras que la

segunda integral le llama Z que es la disgregación de un cuerpo y depende del **arreglo de las partículas**.

De estas dos cantidad Y y Z, se obtiene S,

$$\text{Así, } S = Y + Z$$

donde S entonces [que es igual a  $Q/T$ , y que corresponde al calor Q que a la temperatura T es producida por trabajo (transformación de la especie 1)] es igual al valor de la transformación del calor contenido en el cuerpo a partir de un estado inicial al estado actual, más el valor de la transformación debida al cambio de la disgregación.

## ANEXO 4.1 GUÍA DE ENTREVISTA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**  
**DOCTORADO EN EDUCACIÓN**  
**LÍNEA EN ENSEÑANZA DE LA CIENCIA**

**LA EVOLUCIÓN DE LA ENTROPÍA**  
**Una exploración de su Enseñanza**

### Guía de Entrevista

#### Presentación

La enseñanza de los conceptos científicos ha conformado en los últimos años un campo de investigación específico dentro del ámbito de la educación. Particularmente, la comprensión del concepto de entropía presenta una dificultad especial para los estudiantes de termodinámica, dificultad que se traslada al campo de su enseñanza. Este proyecto, analiza el concepto de entropía debido a Clausius y sigue su evolución histórica. Como complemento se considera indispensable conocer de la práctica docente, por un lado, los referentes teóricos que sustentan la presentación y el desarrollo de la entropía y por el otro, conocer la problemática que enfrenta el profesor en la enseñanza de ese concepto así como la que percibe en el aprendizaje del mismo. A partir de lo anterior se busca aportar elementos que coadyuven a mejorar la comprensión del concepto.

Su colaboración en la contestación de esta guía será de gran ayuda y altamente apreciada. Gracias.

#### GUÍA

##### Datos generales

Nombre (opcional)  
 Lugar de Trabajo  
 Antigüedad Docente  
 Formación Académica  
 Asignaturas que imparte actualmente y que ha impartido  
 Nivel o Semestre  
 Carrera donde ejerce su actividad docente.

##### Con relación a la Termodinámica

1. ¿Qué dificultades percibe en relación a la enseñanza y al aprendizaje de la Termodinámica en general y de la entropía en particular?

##### Con relación a la entropía:

2. ¿Qué conceptos antecedentes considera indispensables para que el alumno comprenda el concepto de entropía?
3. ¿Detecta Ud. en sus alumnos al llegar a su curso alguna idea del concepto de entropía?
4. ¿Utiliza alguna definición de entropía? ¿Cuál dentro de su campo? ¿Y alguna otra fuera de su campo?

5. Por favor explique brevemente ¿cómo introduce y desarrolla el concepto de entropía en sus clases?
6. ¿Cómo explica lo que representa físicamente la entropía?

### Con relación al aspecto histórico

7. Explique por favor ¿qué papel juega en su curso el aspecto histórico y de jugar alguno, qué resalta de ese aspecto? Y, ¿en cuanto a la entropía?
8. ¿Cuál en su opinión es el o los científicos más importantes con relación al concepto de entropía y por qué?

Con respecto a la situación siguiente:

En un estudio que efectuaron dos profesores franceses en 1993 plantean la siguiente pregunta a los 10 alumnos de postgrado en física.

Considere un gas aislado térmicamente que se expande de manera reversible. ¿Qué ocurre con la entropía del gas en esa transformación?

La respuesta esperada es que la entropía permanece constante. No obstante, (conociendo las expresiones matemáticas para la entropía), 7 de los 10 alumnos contesta que la entropía aumenta.

9. ¿Qué problemática en la comprensión de la entropía considera que revela esta respuesta?
10. ¿Esperaría Ud. que sus alumnos ante la misma situación, contestaran como los alumnos franceses? ¿por qué?

### Con relación a Clausius

En este trabajo, como fue mencionado, se está explorando el concepto de entropía desde una perspectiva histórica. Al hacerlo, se ha encontrado que Clausius en 1865 presenta la entropía como constituida de dos términos, bajo la expresión

$$\int \frac{dQ}{T} = \int \frac{dH}{T} + \int dZ$$

H es el calor contenido en el cuerpo y Z es la disgregación.

11. ¿Le resulta conocida esta expresión?
12. Si la respuesta es afirmativa:
  - 12.a ¿Cómo se familiarizó con ella?
  - 12.b ¿Cómo la interpreta?
  - 12.c ¿La menciona en su clase? ¿por qué?

Si la respuesta es negativa:

13. ¿Podría darle alguna interpretación a la expresión completa o a alguno de los términos del segundo miembro?
14. ¿Encuentra alguna relación entre la expresión de Clausius y lo que Ud. enseña como entropía?
15. Enumere tres conceptos cuya comprensión en los alumnos considera indispensable para juzgar que cursaron con éxito su asignatura.

#### **Con relación a la evaluación**

16. ¿Qué problemática plantea la evaluación del concepto de entropía?
17. ¿Qué debe evidenciar el alumno para que Ud. considere que comprendió un concepto?

#### **Con relación a los apoyos bibliográficos**

18. Mencione tres libros que utilice como apoyo para sus clases.
19. ¿Recomienda esos mismos libros a sus alumnos? ¿Por qué?
20. ¿Algún comentario adicional que desee expresar?

**GRACIAS POR SU PARTICIPACIÓN**