



SECRETARÍA ACADÉMICA  
COORDINACIÓN DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN DESARROLLO EDUCATIVO

*“Fundamentación y diseño de una estrategia didáctica basada en la modelización para abordar el fenómeno relativista de la simultaneidad a nivel universitario ”*

Tesis que para obtener el Grado de  
**Maestro en Desarrollo Educativo**  
Presenta

**Ricardo Pérez Peña**

Director de Tesis: **Diana Patricia Rodríguez Pineda**

# Agradecimientos.

A la Dra. Diana Patricia Rodríguez Pineda por las aportaciones que nutrieron el presenta trabajo de tesis.

A la Dra. María del Pilar Segarra Alberú por su entusiasmo para la lectura del manuscrito final, por sus observaciones y las discusiones que me ayudaron a mejorar el texto y la exposición final de las ideas aquí plasmadas.

A los profesores de la Universidad Pedagógica Nacional y en especial a las doctoras Dra. Diana Patricia Rodríguez Pineda, Dra. Dulce María López Valentín y el Dr. Ángel Daniel López y Mota que forman la línea de Educación en Ciencias, quienes contribuyeron a mi formación.

A los miembros del jurado: Dra. Carla Hernández Silva, Dra. Diana Patricia Rodríguez Pineda, Dra. Dulce María López Valentín, Dra. María del Pilar Segarra Alberú y Dr. Ángel Daniel López y Mota, les agradezco su tiempo y dedicación para corregir y enriquecer el manuscrito final.

Esta investigación se llevó a cabo gracias a una beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, dentro del programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado (agosto 2014 a agosto de 2016).

# Índice general

<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>10</b>
<b>1. DELIMITACIÓN DEL TEMA Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>14</b>
1.1. DELIMITACIÓN DEL CAMPO DE “EDUCACIÓN EN CIENCIAS”	14
1.1.1. Recorrido histórico del campo de Educación en Ciencias	15
1.1.2. Conceptualización del campo de Educación en Ciencias	16
1.1.3. La Educación en Ciencias desde la Universidad Pedagógica Nacional	17
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2.1. Investigaciones en Educación en Ciencias, sobre Estrategias Didácticas y concepciones de estudiantes relativas a la Teoría de la Relatividad Especial.	19
1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	25
1.4. OBJETIVO	25
1.5. JUSTIFICACIÓN	25
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS</b>	<b>27</b>
2.1. EL SEMANTICISMO Y LOS MODELOS: UNA FORMA DE CONCEBIR A LA CIENCIA	29
2.1.1. Síntesis propuesta sobre la concepción de modelo	34
2.2. MODELIZACIÓN: CONSTRUCCIÓN Y MANEJO DE MODELOS	37
2.2.1. Síntesis propuesta sobre el proceso de modelización: elementos para su desarrollo en el aula	38
2.3. Aportación para interrelacionar la argumentación y metacognición en la modelización	45

2.3.1. Metacognición . . . . .	45
2.3.2. Argumentación . . . . .	49
2.3.3. Modelización (metacognición $\Leftrightarrow$ argumentación) . . . . .	50
2.4. LAS ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS PARA EL DESARROLLO CURRICULAR, PROPUESTA DE NEUS SANMARTÍ . . . . .	53
2.4.1. Esquematización de la Estrategia Didáctica . . . . .	56
2.4.2. La evaluación dentro de la Estrategia Didáctica . . . . .	58
2.5. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA EL DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA . . . . .	60
2.5.1. Metodología para desarrollar la Estrategia Didáctica bajo la visión de modelos . . . . .	61
<b>3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS: CIENTÍFICO EXPERTO, CURRICULAR, Y COGNITIVO DE LOS ALUMNOS</b> . . . . .	<b>65</b>
3.1. FENÓMENO DE PARTIDA PARA LA SECUENCIA DIDÁCTICA, LA SIMULTANEIDAD DESDE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL . . . . .	66
3.1.1. Contexto inicial: mecánica newtoniana . . . . .	67
3.1.1.1. <i>Transformaciones galileanas</i> . . . . .	67
3.1.1.2. <i>Principio de relatividad</i> . . . . .	70
3.1.1.3. <i>Sistemas de referencia privilegiados</i> . . . . .	71
3.1.1.4. <i>Ondas electromagnéticas y el éter</i> . . . . .	72
3.1.1.5. <i>Ondas electromagnéticas bajo las transformaciones de Galileo</i> . . . . .	73
3.1.2. Teoría de la Relatividad Especial . . . . .	74
3.1.2.1. <i>Concepto relativista del espacio y el tiempo</i> . . . . .	74
3.1.2.2. <i>Postulados de la teoría de la relatividad</i> . . . . .	75
3.1.2.3. <i>Transformaciones de Lorentz basadas en los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial</i> . . . . .	75
3.1.2.4. <i>Fenómeno de la simultaneidad y las transformaciones de Lorentz</i> . . . . .	78
3.2. ELECCIÓN DE UNA SITUACIÓN PARTICULAR DONDE ESTÁ PRESENTE EL FENÓMENO DE LA SIMULTANEIDAD . . . . .	79

3.2.1. Descripción del arreglo experimental, en el que ocurre el fenómeno de la simultaneidad . . . . .	79
3.3. MODELO CIENTÍFICO EXPERTO DEL FENÓMENO DE SIMULTANEIDAD . . . . .	82
3.3.1. Representación matemática del modelo, en el marco del arreglo experimental elegido . . . . .	86
3.4. DISCUSIÓN DE LOS ANTECEDENTES ACADÉMICOS DE LOS ALUMNOS PARA ABORDAR LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL . . . . .	91
3.4.1. Contexto curricular para abordar la Teoría de la Relatividad Especial . . . . .	92
3.4.1.1. <i>Antecedentes académicos, previos al curso de Electromagnetismo I</i> . . . . .	92
3.4.2. Modelo Curricular sobre el fenómeno de simultaneidad, antes de abordar la Teoría de la Relatividad Especial . . . . .	94
3.5. MODELO COGNITIVO DE LOS ALUMNOS INICIAL, SOBRE EL FENÓMENO DE SIMULTANEIDAD . . . . .	95
3.5.1. Simplificación del programa de estudio propuesto para abordar la TRE en la materia de Electromagnetismo I. . . . .	98
3.6. POSTULACIÓN DE LOS MODELOS, CURRICULAR Y CIENTÍFICO ESCOLAR DE ARRIBO, SOBRE EL FENÓMENO DE LA SIMULTANEIDAD . . . . .	101
<b>4. ESTRATEGIA DIDÁCTICA BASADA EN LA MODELIZACIÓN, PARA EXPLICAR EL FENÓMENO RELATIVISTA DE LA SIMULTANEIDAD</b> . . . . .	<b>104</b>
4.1. DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA . . . . .	105
4.1.1. Primer momento de la ED, Actividades de iniciación (AI) . . . . .	106
4.1.2. Segundo momento de la ED, Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP) . . . . .	111
4.1.3. Tercer momento de la ED, Actividades de síntesis (AS) . . . . .	120
4.1.4. Cuarto momento de la ED, Actividades de aplicación (AA). . . . .	124
4.1.5. Nueva situación, para la actividad de aplicación. . . . .	128
4.1.5.1. Modelo Científico Experto de la nueva situación. . . . .	129

---

4.1.5.2. Discusión de la situación nueva . . . . .	133
<b>5. DISCUSIÓN SOBRE LOS APORTES DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA PROPUESTA</b>	<b>135</b>
5.1. APORTE SOBRE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE MODELO . . . . .	135
5.2. MODELIZACIÓN Y SU CONJUNCIÓN CON EL MANEJO DE LA ARGUMENTACIÓN Y LA METACOGNICIÓN . . . . .	137
5.3. MODELO CURRICULAR, PREVIO AL NIVEL EN QUE SE IMPLEMENTARÁ LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA . . . . .	138
5.4. VENTAJAS DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA DISEÑADA EN ESTE TRABAJO . . . . .	139
5.4.1. Estrategias Didácticas, halladas, alrededor de la Teoría de la Relatividad Especial a nivel universitario . . . . .	140
5.4.2. Fortalezas de la Estrategia Didáctica propuesta en este trabajo . . . . .	144
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>146</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>150</b>
<b>Anexos</b>	<b>159</b>
<b>Anexo 1: Instrumentos</b>	<b>159</b>
<b>Anexo 2: Guía para desarrollar las discusiones de clase</b>	<b>163</b>
<b>Anexo 3: Consideraciones para el buen manejo de grupo</b>	<b>167</b>

# Índice de cuadros

1.1. <i>Artículos que reportan el diseño y/o aplicación de Estrategias Didácticas o ideas previas entorno a la Teoría de la Relatividad Especial.</i> . . . . .	20
2.1. <i>Esquemmatización del proceso de modelización.</i> . . . . .	44
2.2. <i>Aspectos para desarrollar la metacognición.</i> . . . . .	51
2.3. <i>Elementos de la argumentación y la explicación en la ciencia.</i> . . . . .	51
2.4. <i>Propuesta para interrelacionar la metacognición y argumentación en la modelización.</i> . . . .	52
2.5. <i>Esquema general de la estrategia didáctica.</i> . . . . .	56
2.6. <i>Modelos para el diseño de la Estrategia Didáctica. Su relación y sus diferencias.</i> . . . . .	62
2.7. <i>Ubicación del MCEA según el MCA inicial y el MC.</i> . . . . .	63
2.8. <i>Uso de Estrategias Didácticas para lograr que el MCEA sea muy similar al MC.</i> . . . . .	63
3.1. <i>Entidades y propiedades del Modelo Científico Experto.</i> . . . . .	82
3.2. <i>Entidades y propiedades del Modelo Curricular antes de abordar la TRE.</i> . . . . .	94
3.3. <i>Entidades y propiedades del Modelo Cognitivo de los Alumnos al iniciar la ED.</i> . . . . .	96
3.4. <i>Programa de la unidad 10 del curso de electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f.d) de la Licenciatura en Física de la UNAM, tomado de Facultad de Ciencias, s.f. d.</i> . . . . .	98
3.5. <i>Simplificación propuesta del mapa curricular de la TRE.</i> . . . . .	101
4.1. <i>Esquema general por sesiones de la Estrategia Didáctica.</i> . . . . .	106
4.2. <i>Primera sesión de la Estrategia Didáctica.</i> . . . . .	107
4.3. <i>Segunda sesión de la Estrategia Didáctica.</i> . . . . .	113



---

4.4. <i>Modelización en la segunda sesión.</i> . . . . .	117
4.5. <i>Tercera sesión de la Estrategia Didáctica.</i> . . . . .	121
4.6. <i>Modelización en la tercera sesión.</i> . . . . .	123
4.7. <i>Cuarta sesión de le Estrategia Didáctica.</i> . . . . .	125
4.8. <i>Modelización en la cuarta sesión.</i> . . . . .	127

# Índice de figuras

2.1. “Relaciones entre el conjunto de afirmaciones, modelos y sistemas reales” (Giere 1988, p.83). . . . .	32
2.2. Esquema del proceso de modelización (Justi y Gilbert, 2002, p. 371). . . . .	39
3.1. Marco de referencia $S^1$ moviéndose con velocidad $v$ en la dirección del eje $x$ . . . . .	68
3.2. Dispositivo experimental ubicado en el sistema de referencia $S^1$ . . . . .	80
3.3. análisis del evento $b$ , desde el sistema de referencia en reposo. . . . .	88
4.1. Efecto Sagnac Imagen extraída de Lipson, Lipson y Lipson (2010, p. 302). . . . .	129

# PRESENTACIÓN

El presente trabajo es un esfuerzo para contribuir en la mejora de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias a nivel universitario, específicamente en el ámbito de la física, mediante la propuesta de una Estrategia Didáctica diseñada para abordar la Teoría de la Relatividad Especial.

La Teoría de la Relatividad Especial representa un reto para el aprendizaje de los alumnos y para los profesores que la enseñan, dado su nivel de abstracción y debido a que los fenómenos que se explican con ella no son cotidianos para nosotros, y que incluso contradicen nuestra intuición cotidiana de lo que puede pasar con algún fenómeno particular, como lo es la dilatación del tiempo.

Un ejemplo de lo anterior es el fenómeno de los muones que viajan del Sol a la Tierra. Los muones son un tipo de partícula cuyo tiempo de vida es de dos millonésimas partes de segundo, es decir que después de ese tiempo dejan de existir. Éstas partículas viajan a una velocidad muy alta, que es aproximadamente el 99.97% de la velocidad de la luz (el valor de la velocidad de la luz es de  $3 \times 10^8 m/s$ ).

Si calculáramos la distancia que puede viajar una de estas partículas en su tiempo de vida encontraríamos que sólo recorrería unos 450m antes de dejar de existir. Resulta que la distancia de la Tierra al Sol es de  $149,6 \times 10^9 m$  y estos muones logran llegar a la Tierra, lo que equivaldría a un tiempo de vida  $3 \times 10^8$  veces más grande. A este fenómeno se le conoce como la dilatación del tiempo y es más evidente cuando la velocidad de los objetos involucrados no es despreciable en relación con la velocidad de la luz. Para explicar fenómenos como el descrito, es necesario hacer uso de la Teoría de la Relatividad Especial y para ello se debe ahondar en la comprensión de la misma. En este sentido se propone dentro de esta aportación diseñar una Estrategia Didáctica basada en la

modelización para contribuir a la mejora de la enseñanza de la Teoría de la Relatividad Especial en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, con alumnos de la carrera de física.

Para poder realizar la estrategia didáctica fue necesario emprender diferentes acciones. En primer lugar se hizo una búsqueda en artículos especializados del campo de la Educación en Ciencias, para encontrar investigaciones relacionadas con el diseño de Estrategias Didácticas para abordar la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), también se buscaron investigaciones que reportaran las ideas previas de los estudiantes en torno a dicha teoría. Gracias a los hallazgos encontrados se pudo formular con claridad una pregunta de investigación y el objetivo del estudio, así como la justificación del mismo. Lo anterior está expuesto en el capítulo 1 de este trabajo.

Posteriormente en el capítulo 2 se fundamentó teóricamente la Estrategia Didáctica (ED) y para ello se hizo una revisión bibliográfica que permitió proponer una síntesis de la conceptualización de modelo necesaria para este trabajo. De igual modo se realizó una investigación bibliográfica para entender el proceso que se lleva a cabo al construir y utilizar los modelos y la modelización.

En el proceso de modelización se consideró interrelacionar dos aspectos que Izquierdo-Aymerich y Adúriz Bravo (2003) mencionan de gran relevancia dentro del campo de la Educación en Ciencias, la argumentación y metacognición. Lo anterior se pudo hacer gracias a una revisión bibliografía para encontrar elementos que permitieran embonar la modelización con los dos aspectos antes mencionados de forma que se contara con una propuesta coherente y sintética de dicho proceso, que no se ha reportado en investigaciones previas. Como parte de la fundamentación, también se realizó una revisión bibliográfica con la intención de tener una base metodológica sólida que permitiera diseñar la Estrategia Didáctica, y se decidió seguir la propuesta de Neus Sanmartí por considerarla pertinente para este trabajo.

Posteriormente, en el tercer capítulo, se desarrollaron componentes necesarias de la ED para efectuarla en términos de la modelización. Entre ellas se encuentra la distinción de los modelos a considerar según la base que sirva para su construcción, por ejemplo, las ideas previas de los alumnos sobre la TRE, el currículo que se sugiere para abordar la TRE, y la ciencia erudita.

En relación a la ciencia erudita se realizó la fundamentación disciplinar de la ED. Por ese propósito se consultaron fuentes, principalmente libros de texto de nivel licenciatura, que permitieron ubicar una situación detonante para la ED. Se eligió un arreglo hipotético donde pudiera enmarcarse el fenómeno de la simultaneidad relativista y se construyó el modelo que permitiera explicar dicho fenómeno según la ciencia erudita, a dicho modelo se le denomina como Modelo Científico Experto (MCE).

En el mismo capítulo se hizo una revisión del currículo de la Licenciatura en Física, con la intención de proponer el modelo que los alumnos podrían construir para explicar el fenómeno de la simultaneidad, al finalizar la unidad de Electromagnetismo I. A dicho modelo se le denomina Modelo curricular (MC).

Además se consideraron resultados de las investigaciones donde hay reportes de ideas previas de alumnos, principalmente de nivel universitario, en torno a diversos aspectos de la TRE. Con ello fue posible postular el modelo que construirían los alumnos antes de abordar o conocer la TRE. A este modelo se le denomina como Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial).

Al comparar los modelos mencionados (MCE, MC y MCA inicial) se postuló teóricamente el modelo que los alumnos alcanzarían después de aplicar la ED con el enfoque de la modelización. A dicho modelo se le denomina como Modelo científico Escolar de Arribo (MCEA).

En el cuarto capítulo se desarrolla el diseño de la ED basada en la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013), la cual interrelaciona lo descrito anteriormente. En la presente contribución se nutre la propuesta antes mencionada con la síntesis elaborada acerca de los que se puede entender por modelo y sobre la modelización, interrelacionando a la argumentación y la metacognición en este proceso. A modo de resumen se presentan los aspectos más importantes que forman parte del diseño de la ED:

- La concepción semanticista de la ciencia que sirvió de base para elaborar la síntesis sobre la concepción de modelo, propuesta en el presente trabajo, que complementa propuestas previas sobre los modelos.
- La síntesis acerca del proceso de modelización, que también se propuso en este trabajo. Dicha

propuesta considera el uso de la argumentación y la metacognición como aspectos fundamentales para desarrollar la modelización, de modo que los estudiantes reflexionen acerca de la forma en que los científicos expertos construyen el conocimiento científico.

- La conceptualización de las estrategias didácticas, según la propuesta de Neus Sanmartí.
- La elección de un fenómeno particular, enmarcado dentro de la TRE, y la postulación de los distintos modelos (MCE, MC, MCA inicial y MCEA) que permiten desarrollar la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013).

Al finalizar el diseño de la ED, en el quinto capítulo se discuten los aportes que se generaron a partir del diseño de la ED, y en el sexto capítulo se dan las conclusiones que se pueden derivar de este trabajo.

# Capítulo 1

## DELIMITACIÓN DEL TEMA Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este apartado se da cuenta del área temática en la que se instala tanto teórica como empíricamente este trabajo de investigación, el cual corresponde al campo de Educación en Ciencias<sup>1</sup>, también conocido como Didáctica de las Ciencias. Además se presentan los antecedentes de investigación que permiten plantear el problema y configurar el objeto de estudio, así como la pregunta de investigación que guía este trabajo. Finalmente se exponen los argumentos que justifican la importancia de llevar a cabo la propuesta.

### 1.1. DELIMITACIÓN DEL CAMPO DE “EDUCACIÓN EN CIENCIAS”

A continuación se hace una breve descripción del desarrollo histórico del campo de Didáctica de las Ciencias de forma general y posteriormente se describirá la visión del grupo de trabajo de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN), en el contexto mexicano, que tiene como una de las líneas de investigación el “Desarrollo Curricular”, en el cual se enmarca el presente trabajo.

---

<sup>1</sup>Para efectos de este trabajo mantendremos la denominación de Educación en Ciencias, ya que como lo mencionan Rodríguez, Izquierdo y López (2011) la denominación de Didáctica de las Ciencias “para el contexto mexicano, ha sido sinónimo de ‘metodologías de enseñanza’ ” (p.14).

### 1.1.1. Recorrido histórico del campo de Educación en Ciencias

Adúriz-Bravo e Izquierdo (2002) distinguen cinco etapas en el proceso de constitución del campo de Educación en Ciencias; ellos plantean que éste aparece de manera difusa desde finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, etapa donde las investigaciones en torno a la enseñanza de las ciencias no tienen conexión, y por lo tanto no se puede hablar de la existencia de una disciplina autónoma. La segunda etapa se ubica entre los años 50 y 60 como resultado de la guerra fría, cuando los Estados Unidos percibieron un rezago científico con respecto a la ex Unión Soviética, razón por lo que implementaron diversos programas educativos -mediante cambios curriculares- y de investigación de carácter eficientista. La tercera etapa se puede identificar en la década de los 70, ya que existe un consenso más amplio acerca de los problemas por abordar, ligados inicialmente “al aprendizaje de contenidos específicos de ciencias” (Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2002, p. 133); en esta etapa no hay predominancia de ninguna escuela que sirva de guía teórica para las investigaciones del campo.

Ya en la década de los años 80 -cuarta etapa- la Educación en Ciencias se considera como una disciplina emergente (Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2002). En ella existe ya una línea prioritaria de investigación centrada en lo que se conoce como preconcepciones, concepciones alternativas, ideas previas de los alumnos, etc. (Gil, 1994; Gil, Carrascosa y Martínez, 2000), la cual sirvió para dar claridad al campo emergente y para cuestionar la idea que se tenía acerca del aprendizaje y la enseñanza de las ciencias. A partir de ello se prestó mayor atención a la Historia y Filosofía de la Ciencia, lo cual generó el interés por investigar las ideas epistemológicas de los profesores, que tienen incidencia en la enseñanza de las ciencias; además, uno de los consensos en ésta etapa fue la adopción de un marco teórico constructivista (Gil, 1994; Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2002).

En la última etapa, posterior a los años 80, la Educación en Ciencias se reconoce como una disciplina caracterizada por tener un cuerpo teórico, una comunidad académica, una gran cantidad de publicaciones, congresos propios, y por ser enseñada en programas de posgrado, por lo cual se reafirma como una disciplina autónoma y consolidada (Gil, 1994; Adúriz-Bravo e Izquierdo-Aymerich, 2002).



### 1.1.2. Conceptualización del campo de Educación en Ciencias

Antes de dar cuenta del objeto de estudio de la Educación en Ciencias, resulta relevante señalar lo que Linjse y Klaassen (2000) mencionan acerca de la denominación de la Didáctica de la Ciencia. Esta última surge como una preocupación por justificar y desarrollar propuestas de enseñanza con el propósito de determinar por qué y cómo enseñar ciencias a alguien. Por su parte, en las investigaciones de Educación en Ciencias, la preocupación parecería de carácter más teórico, en tanto que describe y abarca la enseñanza. Linjse (2000) añade que podría existir una superposición entre ambos campos, y menciona que ninguno es mejor que otro; más bien, debe existir una retroalimentación entre ellos para progresar en la enseñanza de las ciencias.

Como ya se expuso, en el contexto mexicano se ha adoptado la denominación de Educación en Ciencias (López-Mota y Waldegg 2002; Rodríguez, López, López y Flores, 2013; Ávila, Carrasco, Gómez, Guerra, López-Bonilla, y Ramírez, 2013) dado que “el objeto de estudio de esta ‘ciencia del aula’ es más amplio que el que se otorga de manera tradicional a la ‘didáctica’, que supuestamente se ocupa sólo de las estrategias de enseñanza” (Rodríguez, Izquierdo y López, 2011, p. 14).

De acuerdo con Rodríguez et al. (2013), el campo de Educación en Ciencias tiene como objeto:

*Entender y mejorar el aprendizaje de las ciencias naturales en individuos y grupos escolares, en todos los niveles educativos, así como su enseñanza; a partir de considerar las representaciones mentales de los sujetos relativas a la naturaleza de la ciencia -epistemología-, al aprendizaje -los procesos cognitivos- y a los fenómenos naturales, lo que repercute en la generación de conocimiento de distintos aspectos de la educación en ciencias, como: currículo como estructura y como proceso -desarrollo curricular- centrado particularmente en la modelización; formación y actualización de profesores; gestión escolar; evaluación del aprendizaje; diferencias étnicas y de género (p. 63).*

### 1.1.3. La Educación en Ciencias desde la Universidad Pedagógica Nacional

El grupo de Educación en Ciencias de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) desarrolla proyectos de intervención e investigación en cuatro ámbitos, teniendo como un eje transversal la formación y actualización de profesores de ciencias, a saber:

- Diseño y desarrollo curricular.
- Representaciones mentales de los sujetos.
- Práctica docente y evaluación de los aprendizajes.
- Ambientes de aprendizaje y gestión escolar en el aula.

Particularmente en el ámbito de diseño y desarrollo curricular, es fundamental la participación del profesor dado que él es el responsable de hacer realidad el currículo en el aula, tal como lo plantean Driver y Oldham (1998), quienes consideran que es fundamental “implicar a los profesores como colaboradores en un programa de investigación-acción sobre el desarrollo, prueba y evaluación de enfoques de enseñanza” (p. 118). Por lo tanto “es en el primer ámbito de investigación, en el que se circunscribe la formación continua de profesores de la línea de Enseñanza de las Ciencias Naturales de la Maestría en Desarrollo Educativo (MDE) de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN). En esta línea se realizan tesis-intervención educativa y eventualmente de innovación-, principalmente en el terreno del desarrollo curricular” (López-Mota, Rodríguez Pineda, Reyes Cárdenas, Flores López, Martínez Moctezuma y López Becerra, 2012, p. 6). En este ámbito se circunscribe este trabajo. La propuesta de la Línea de Educación en Ciencias de la UPN consiste en la construcción de una herramienta teórica metodológica para guiar el proceso de diseño de estrategias didácticas, tomando en cuenta las ideas y explicaciones que los alumnos tienen acerca de los fenómenos naturales previas a su enseñanza; el currículo que enmarca las intervenciones en un nivel académico, y la ciencia erudita.

La herramienta teórico metodológica que guía el proceso de diseño e implementación de las estrategias didácticas es lo que López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) han denominado el Modelo

Científico Escolar de Arribo (MCEA), el cual se explicará más adelante en el marco teórico, y el Modelo Cognitivo de los Alumnos (MCA), el cual intenta recuperar las explicaciones que los alumnos dan a los fenómenos científicos.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, en el apartado del recorrido histórico sobre la emergencia de la Educación en Ciencias, a finales del siglo XIX y mediados del siglo XX se considera que no existe el campo de Educación en Ciencias como tal; sin embargo, en el ámbito universitario en esa época existía preocupación por la enseñanza de las ciencias, lo cual llevó a que, por ejemplo, en la Universidad de Berlín se incorporara la enseñanza de desarrollos científicos recientes para ese entonces. Tal es el caso de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), que fue introducida por Max Planck un año después de su publicación en 1905 por Albert Einstein (Etxebarría, 2000).

En relación a lo anterior Glick (1987) sostiene que se pueden presentar dos formas en la aceptación de una teoría: activa y pasiva. En el primer caso, los miembros de una disciplina tienen acceso directo a las nuevas ideas, y existe suficiente madurez del campo; ambos elementos, sumados a una comunidad numerosa, posibilitan la conformación de instituciones para difundir y discutir las ideas. De esta forma, los grupos generalmente contribuyen al desarrollo del conocimiento de la disciplina con su propia investigación. Por otro lado, en la aceptación pasiva no se tiene contacto directo con los desarrollos científicos, además de que la comunidad depende de traducciones para seguir los avances en el campo, por lo que se presentan atrasos para asimilar los nuevos conceptos. Ambos modos de asimilación “pueden relacionarse de forma más amplia con el contexto social a través de la estructura de los sistemas educativos” (Glick, 1987, p. 383). Esto último hace notar la necesidad de mantener una vigilancia constante en la educación de las ciencias. Se puede vincular lo anterior con la aceptación de la TRE a partir de su publicación en 1905; en este sentido, Glick (1987) afirma que este proceso estuvo interrelacionado a la estructura profesional de la comunidad científica de cada país, así como al grado de desarrollo científico en física, matemáticas y astronomía. Lo anterior

sirve para dar relevancia a los esfuerzos que se hagan con la intención de mejorar la educación de las ciencias dentro de las universidades.

A continuación se presentaran elementos que permiten ver la pertinencia y la importancia del presente trabajo, que tiene como finalidad el diseño de una estrategia didáctica para la enseñanza de la Teoría de la Relatividad Especial en la Licenciatura en Física.

### **1.2.1. Investigaciones en Educación en Ciencias, sobre Estrategias Didácticas y concepciones de estudiantes relativas a la Teoría de la Relatividad Especial.**

Con la finalidad de conocer lo que en la investigación educativa dentro del campo de Educación en Ciencias se ha reportado respecto a las ideas previas de los estudiantes y el diseño de secuencias de enseñanza para abordar la TRE, se realizó una búsqueda bibliográfica en revistas especializadas del campo. Como producto de dicha búsqueda se hallaron 18 artículos. Dentro de ellos, 17 corresponden a investigaciones realizadas y uno es un análisis de tipo teórico. Las investigaciones encontradas están enmarcadas dentro de cinco niveles educativos: en secundaria se encontró una investigación que da cuenta de las ideas previas de los estudiantes (Dimitriadi y Halkia, 2012). En el nivel medio (preparatoria) se encontraron seis artículos; de éstos, uno de ellos reporta las dificultades a las que se enfrentan los docentes cuando enseñan el tema de la TRE (Arriassecq y Greca, 2004); otros cuatro proponen una secuencia didáctica que toma en cuenta las ideas previas de los estudiantes (Borghi, De Ambrosis y Ghisolfi, 1993; Gil y Solbes, 1993; Alemañ y Pérez, 2000; Arriassecq y Greca, 2012); y uno más presenta un análisis del tratamiento que se le da a la TRE en los libros de texto en Argentina destinados a estudiantes de preparatoria (Arriassecq y Greca, 2007). Con estudiantes universitarios y de posgrado se reportan once trabajos (ver cuadro 1.1), de los cuales siete reportan ideas previas; dos exponen únicamente el diseño y la aplicación de una Estrategia Didáctica; uno considera tanto ideas previas como el diseño y aplicación de una secuencia didáctica, y un último artículo hace un análisis teórico de las ideas previas de los estudiantes sobre la TRE para caracterizarlas.

Cuadro 1.1: Artículos que reportan el diseño y/o aplicación de Estrategias Didácticas o ideas previas entorno a la Teoría de la Relatividad Especial.

Referencia	Título	N	Población	E
Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978	Teaching relativity with a different philosophy	U	Alumnos de 1er y 2do año de universidad	ED
Hewson, 1982	A case study of conceptual change in special relativity: the influence of prior knowledge in learning	U	Un profesor de física graduado	IP
Posner, 1982	Acomodation of scientific conception: toward a theory of conceptual change	U	Estudiantes que no han cursado cálculo, estudiantes que cursaron relatividad especial y profesores de física	IP
Villani y Pacca, 1987	Students' spontaneous ideas about the speed of light	P	Estudiantes universitarios de física graduados que cursaban maestría o doctorado	IP
Villani y Pacca, 1990	Spontaneous reasoning of graduate students	P	Cien estudiantes de física graduados que están en maestría o doctorado en física, o en educación de las ciencias	IP
Toledo, Arriasecq y Santos, 1997	Análisis de la transición de la física clásica a la relativista desde la perspectiva del cambio conceptual	U	Alumnos de 4º año de la carrera de profesorado en matemática y física, además alumnos de 3 <sup>er</sup> año de la licenciatura de física	IP
Pietrocola y Zylbersztajn, 1999	The use of the principle of relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students	U	Estudiantes de primer y último año de la carrera de física	IP
Scherr, Shaffer y Vokos, 2001	Student understanding of time in special relativity: simultaneity and reference frames	U	800 estudiantes: de niveles introductorios que cursan cálculo; de niveles intermedios que cursan electromagnetismo; relatividad y gravitación; que se forman para ser profesores de preparatoria y estudiantes graduados	IP
Scherr, Shaffer y Vokos, 2002	The challenge of changing deeply student beliefs about the relativity of simultaneity	U	350 estudiantes de un curso introductorio de cálculo y alumnos no graduados en cursos avanzados de electromagnetismo, relatividad y gravitación	ED
Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009	Students' understanding of the special theory of relativity and design for a guided visit to a science museum	U	35 estudiantes en el primer año de la carrera de ingeniería que tomaron un curso de física general en la universidad	IP y ED

Nota. La letra T denota una investigación de tipo teórico, la letra N denota el nivel educativo que puede ser Universitario (U) o de posgrado (P); mientras que el propósito del estudio se denota con la letra E, que puede ser la propuesta de una Estrategia Didáctica (ED) o el reporte de Ideas Previas (IP). Cuadro de construcción propia.

Los resultados de los artículos del cuadro (1.1) permiten inferir la existencia de un problema en torno a la enseñanza y el aprendizaje de la TRE. En los once artículos, se reportan ideas previas de los estudiantes, de las cuales se desprende que, aún cuando ya tomaron cursos de Relatividad Especial, permanecen con una visión propia de la mecánica clásica (Hewson, 1982; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999) en la que las propiedades de los objetos, como la contracción de la longitud o la masa de un cuerpo, no cambian (Hewson, 1982). Así, en algunos casos, los estudiantes afirman desatinadamente que el fenómeno de la contracción de la longitud es una distorsión de la percepción (Posner, 1982; Villani y Pacca, 1987), al igual que la dilatación del tiempo, pues suponen que tanto para la longitud y el tiempo debe existir una única medición (Villani y Pacca, 1987).

También se ha encontrado que los alumnos conservan la idea del espacio y del tiempo (Posner, 1982), de sistemas de referencia absolutos (Villani y Pacca, 1987; 1990), o que consideran la velocidad, las distancias recorridas y las trayectorias como cantidades independientes de los sistemas de referencia (Villani y Pacca, 1990). Además se reportan otras dificultades de los estudiantes en relación con los marcos de referencia; por ejemplo, en algunos casos ellos mencionan que cada observador es en sí mismo un sistema de referencia, sin importar que exista reposo relativo entre los observadores (Scherr, Shaffer y Vokos, 2001), o que haya una falla en reconocer que, si un evento es observado en un sistema de referencia, también será observado en cualquier otro, lo cual refleja una tendencia a pensar en la existencia de realidades distintas para cada marco de referencia (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002). Por las dificultades detectadas se propone que al enseñar la TRE se explore el conocimiento previo de los estudiantes sobre la mecánica clásica, con esto es posible establecer el punto de partida al diseñar las intervenciones en el aula (Villani y Pacca, 1987; 1990; Toledo, Arriasecq y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Scherr, Shaffer y Vokos, 2001; 2002; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009; Selçuk, 2011).

Otros de los resultados relevantes son los que proporcionan Villani y Pacca (1987; 1990), quienes trabajaron con estudiantes de posgrado (maestría o doctorado en física o en educación de las ciencias). Los autores antes mencionados encontraron en su estudio que los estudiantes con los que hicieron su investigación expresaron ideas que parecen consistentes con las de la TRE, pero que al

ser analizadas no lo son del todo. Los reportes agregan que las ideas de los estudiantes con los que trabajaron guardan similitudes con las de aquellos que se encuentran iniciando la universidad. Lo anterior sugiere que los alumnos no articulan la TRE para utilizarla en situaciones complejas relacionadas con dicha teoría, además de que su conocimiento sobre la TRE es más bien superficial y que hacen uso de su 'sentido común', provocando que sus explicaciones no se sostengan ante cuestionamientos (Villani y Pacca, 1990; Toledo, Arriasec y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999). Villani y Pacca (1990) mencionan que tales resultados no son ocasionados por una falta de habilidades matemáticas, pues muchos de los alumnos que participaron en su estudio trabajaban en temas de física teórica, entonces argumentan que estos hallazgos se pueden explicar por la naturaleza del contenido de la TRE y/o por la forma de razonar que tienen los estudiantes, la cual construyen individualmente a lo largo de su vida y que es difícil cambiar.

Además en estudiantes universitarios se presenta una coexistencia entre las explicaciones propias de la física clásica y la TRE, junto con un conocimiento superficial de esta teoría, lo cual provoca que no posean una base sólida para operar la TRE (Toledo, Arriasec y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Scherr, Shaffer y Vokos, 2002). Una de las razones que podría ayudar a entender lo anterior es que los estudiantes tienen poco conocimiento sobre los orígenes de la TRE, lo cual no permite diferenciar esta teoría con la mecánica clásica (Toledo, Arriasec y Santos, 1997). A lo anterior puede agregarse el hecho de que los estudiantes no mencionan explícitamente el principio de relatividad en sus respuestas (Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Selçuk, 2011) y que no asimilan las implicaciones de la invarianza de la velocidad de la luz, por lo cual no pueden utilizar esto para analizar situaciones relativistas (Scherr, Shaffer y Vokos, 2001; 2002; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno 2009). En este sentido, Villani y Arruda (1998, citado en Guisasola et al., 2009) señalan que durante los cursos de cinemática y óptica no se aborda o no se le da mucha relevancia a la medición de la velocidad de la luz, lo cual podría explicar el hecho de que los estudiantes no asimilen las implicaciones del segundo postulado de la TRE.

Entre las sugerencias que se encontraron en los artículos mostrados en el cuadro 1.1 para mejorar la enseñanza de la TRE, se encuentra en primer lugar el hecho de poner mayor atención al entrena-

miento de los profesores con la finalidad de cambiar el modo tradicional de enseñanza en el que el profesor da toda la información, la cual es recibida por los alumnos (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978); y, como lo mencionan Posner, Strike, Hewson and Gertzog (1982), los profesores deben asumir un papel de “adversario en el sentido socrático” (p. 226) para enfrentar a los estudiantes en los problemas que surjan por la incompatibilidad de sus concepciones con el conocimiento científico durante la construcción del suyo. En este sentido, los profesores deben reconocer que las concepciones de las personas y sus compromisos epistemológicos juegan un papel muy importante en el proceso de aprendizaje o de construcción de conocimiento por parte de los alumnos (Hewson, 1982; Posner, 1982). Posner (1982) pone de ejemplo el caso de Einstein (1949, citado en Posner, 1982), quien aseguraba que una teoría “no debía contradecir los hechos empíricos” y que las teorías debían tener una “simplicidad lógica” (p. 218). Los estudiantes no necesariamente conocen o comparten la visión que tenía Einstein, la cual es asumida por la comunidad científica en general, por lo cual es lógico pensar que hacer inteligibles estos principios a los estudiantes serán de gran utilidad en el proceso de la enseñanza de la TRE.

Además es pertinente señalar lo que Scherr, Shaffer y Vokos (2002) mencionan acerca de las paradojas, las cuales son utilizadas por los profesores para confrontar y exponer las ideas de los estudiantes con algún fenómeno relativista que contradiga su intuición, para luego resolverlas. Según los autores este enfoque no es el más adecuado sino más bien es necesario que los estudiantes tengan un papel activo en la confrontación de sus ideas y la resolución de las contradicciones. Por último los profesores deben cuidar la forma de comunicar las ideas en el aula, ya que como lo menciona Selçuk (2011), si se utilizan palabras como ‘ver’ y ‘parecer’ en vez de ‘medir’ y ‘observar’ existe la posibilidad de que los estudiantes terminen con la idea de que los fenómenos relativistas son una cuestión de percepción.

Por último, en las investigaciones en las que se diseñó una secuencia didáctica los autores reportan buenos resultados al utilizar métodos no tradicionales en los que se da mayor importancia a las ideas previas de los estudiantes y al hecho de que ellos mismos las analicen (Angotti et. al., 1978, Arriaseq & Greca, 2012, Guisasola et. al., 2009, Scherr et. al, 2002).



También apuntan que una dinámica de aula lo más abierta posible a la discusión, junto con el diseño de materiales de estudio centrados en ella, posibilita que los estudiantes recurran a una argumentación científica apoyada en evidencias que conozcan -las cuales deben irse proporcionando en el desarrollo de la secuencia- (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009). Además los autores señalan algunas limitaciones, como el hecho de que en la implementación de las secuencias no todos los estudiantes muestran la habilidad de soportar y justificar sus ideas con argumentos científicos (Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009), o que la elección de un método abierto a la discusión limita la cantidad de contenido que puede cubrirse en relación a una clase tradicional (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978). En este contexto, cobra gran relevancia el diseño de Estrategias Didácticas para mejorar la enseñanza de las ciencias, en particular con temas de gran abstracción como lo es la TRE.

Lo anterior pone de manifiesto que existe un problema de aprendizaje respecto a la relatividad especial, además de retos para mejorar su enseñanza, puesto que las ideas previas persisten y de modo general no se logran transformaciones en las explicaciones de los alumnos sobre fenómenos relativistas, ni la argumentación científica deseada. A partir de esto, nos planteamos la siguiente tesis:

Al diseñar una ED para enseñar el tema de relatividad especial desde el enfoque teórico de los modelos y la modelización -donde se centre la enseñanza en la explicación y argumentación científica y se haga uso de procesos metacognitivos por parte de estudiantes universitarios- acerca del fenómeno relativista de simultaneidad de eventos, se deberán encontrar criterios y proponer diseños didácticos que permitan lograr que los modelos iniciales de carácter clásico -desde la perspectiva galileana-, transiten a modelos relativistas -desde la perspectiva de la TRE, haciendo uso de la modelización, la argumentación y metacognición. Con ello se postula la posibilidad de promover la transformación en el pensamiento de los estudiantes para que sean conscientes del proceso de modelización y de los modelos que construyan.

### 1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Con base en los hallazgos de investigación reportados en el planteamiento del problema, se tiene un punto de partida sólido para postular la pregunta de investigación que se presenta a continuación:

¿Cuáles son las características del diseño de una Estrategia Didáctica sobre el fenómeno relativista de la simultaneidad basada en la modelización, que posibilitan la transformación de los modelos y que propician el uso de la argumentación científica y la metacognición por parte de los estudiantes universitarios?

### 1.4. OBJETIVO

El objetivo general que guía la investigación está relacionado directamente con la pregunta que se postula para el presente trabajo. Dicho objetivo se presenta a continuación:

Diseñar una secuencia didáctica relacionada con la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), sustentada en la perspectiva teórica de la modelización, para transformar los modelos de los estudiantes de licenciatura en física, sobre el fenómeno relativista de la simultaneidad, mediante el uso de argumentos científicos.

### 1.5. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta los reportes de investigación en torno a la TRE, revisados en el apartado 1.2.1, se considera pertinente adoptar un enfoque constructivista en el presente trabajo, con la intención de lograr que los estudiantes se involucren en la construcción de su conocimiento y de promover el desarrollo en la enseñanza de las ciencias, que propicie una mejora en el aprendizaje. Se partirá de los aciertos y las limitaciones reportadas en las investigaciones mostradas en el cuadro 1.1, para fundamentar con solidez la propuesta de intervención en el aula que se desarrollará y documentará en el presente trabajo.

Como ya se mencionó, el nivel educativo en que está situado este trabajo, es el universitario,

donde podría pensarse que no es necesario desarrollar Estrategias Didácticas para mejorar la enseñanza de las ciencias; pero como se mostró anteriormente, en el caso de la TRE, hay deficiencias en el aprendizaje de la TRE a distintos niveles (ver sección 1.2.1), incluso en posgrado (Villani y Pacca, 1987). Por lo tanto se hace patente la necesidad de innovar y repensar la educación en ciencias. Particularmente en este trabajo se asumió esta tarea y se espera que la validación y futura implementación de la Estrategia Didáctica propuesta, sirva como referente para el diseño curricular y aporte elementos para mejorar la enseñanza de la Teoría de la Relatividad Especial.

Por último, se puede retomar nuevamente la idea de Glick (1987) acerca de la aceptación de nuevas teorías por parte de las comunidades científicas de cada país, por lo que es deseable promover en México que los estudiantes de ciencia (física en nuestro caso) tengan un conocimiento sólido de la TRE, dado que es la base para el desarrollo de la física moderna. Además hoy en día, a diferencia de los inicios del siglo XX, ya se cuentan con aplicaciones tecnológicas propias de la relatividad, tal es el caso de las comunicaciones satelitales, donde se necesita hacer uso de esta teoría para poder sincronizar los satélites.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS

En este apartado se exponen los fundamentos que soportan teórica y metodológicamente el presente trabajo. En la primera sección de este capítulo, se expone una revisión que posibilita entender de forma general qué es la visión de modelos, y se hacen precisiones para fundamentar una propuesta que sintetiza lo que es un modelo desde el semanticismo.

La síntesis de modelo propuesta en este trabajo es un aporte teórico necesario para el diseño de la Estrategia Didáctica, ya que en la literatura no hay un consenso acerca de lo que es un modelo o bien las propuestas encontradas no concretan con claridad lo que es un modelo. Sin dicha claridad, sería un error hacer el diseño de una Estrategia Didáctica basada en la visión de modelos, dado que se parte de suponer que los estudiantes construirán modelos para representar y explicar fenómenos de interés para la ciencia, por lo que sin una base teórica sólida sobre los modelos, no podrán analizarse apropiadamente las construcciones de los alumnos en estos términos.

Se debe remarcar que no basta tener una idea clara de lo que es un modelo, para poder realizar el diseño de una Estrategia Didáctica basada en la modelización, debido a que con la modelización se supone posible lograr un transito de los modelos iniciales de los alumnos a modelos que concuerden cada vez más con los de la ciencia erudita. Por tal motivo se llevó a cabo una revisión teórica que

---

permitió proponer una síntesis de la modelización para operar con él en la Estrategia Didáctica. La modelización a grandes rasgos se puede entender como un proceso en el que se construyen y utilizan modelos para representar y explicar ciertos fenómenos que son de interés para la ciencia.

Al realizar la síntesis de la modelización se observaron ciertos aspectos en este proceso que embonan con otros dos componentes: la argumentación y la metacognición. Para fundamentar lo anterior se realizó una revisión bibliográfica que permitiera extraer lo más importante de dichas componentes, con la intención de tener una propuesta coherente de la modelización.

La coherencia de este aporte, se logra al interrelacionar la síntesis de modelo, con el proceso de modelización y a su vez en este proceso se hacen explícitos los aspectos que son propios de la argumentación y metacognición.

Finalmente, con la síntesis de la modelización se diseñó una Estrategia Didáctica para enseñar la Teoría de la Relatividad Especial, ante lo cual se tuvo que contar con una fundamentación metodológica para conceptualizar a las Estrategias Didácticas.

En el trabajo de Izquierdo-Aymerich y Adúriz Bravo (2003) se analizan distintos elementos que confluyen dentro del campo de la Educación en Ciencias. Uno de ellos está relacionado con la visión de la ciencia, en particular con la epistemología de la ciencia, es decir el modo en que se produce el conocimiento científico. La relación anterior queda bien expresada por Duschl (1990) quien afirma que “para tener una imagen completa de la ciencia, el currículo para la enseñanza de las ciencias debe contemplar no solamente el conocimiento de la ciencia, sino también como se llegó al conocimiento científico” (p. 10). En este trabajo se adopta el enfoque semanticista de la ciencia que considera de gran relevancia a los modelos para la ciencia. Los mismos autores también mencionan que dentro del campo de Educación en Ciencias también está presente la importancia de los procesos metacognitivos -con los que se pretende lograr en los estudiantes una autonomía de pensamiento-, y mencionan que existe un creciente interés por el desarrollo de la argumentación y la metacognición en las clases de ciencia.

Cabe señalar que la idea central de este capítulo es embonar los componentes antes mencionados, de modo que mediante el diseño de una Estrategia Didáctica se disponga de una herramienta

para desarrollar el proceso de modelización entorno al fenómeno de simultaneidad, enmarcado dentro de la Teoría de la Relatividad Especial. Dentro del proceso de modelización se considera el desarrollo de la argumentación y la metacognición como soportes que permitirán consolidar los modelos que construyan de forma gradual los estudiantes, de sus modelos iniciales a modelos cada vez más cercanos a los que se aceptan en la ciencia erudita.

## 2.1. EL SEMANTICISMO Y LOS MODELOS: UNA FORMA DE CONCEBIR A LA CIENCIA

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta en el marco de la educación de las ciencias que consiste en el diseño de una estrategia didáctica basada en la construcción de modelos. Por lo tanto es necesario tener claridad acerca de los modelos y con esta finalidad se realizó una búsqueda de referentes dentro de la filosofía de la ciencia.

La filosofía de la ciencia surgió como disciplina en el siglo XX a raíz de la separación de la filosofía y de la ciencia, ya que anteriormente se desarrollaban ambas de forma conjunta en las investigaciones científicas. Dentro de esta disciplina surgió una corriente de pensamiento denominada como positivismo lógico o empirismo lógico que desarrollaron principalmente dos grupos, uno en Vienna (Schlick, Carnap y Neurath) al que se le conoció como Círculo de Vienna, y otro en Berlín (Reichenbach y Hempel). Además existió un tercer grupo en Varsovia enfocado en métodos lógicos (Tarski, Lesnewski y Kotarbinski) (Machamer, 2008).

Dentro del Círculo de Vienna se desarrolló una corriente de pensamiento denominada como el “giro lingüístico” en la que se veía a las teorías científicas como sistemas formalizados en lenguajes artificiales (lógico y matemático). A partir de esto surgieron críticas que afirmaban que con esta visión se perdían de vista las prácticas de la ciencia y se generó un rechazo hacia el positivismo lógico. Posteriormente se comenzó a desarrollar el giro histórico para analizar el desarrollo de la ciencia y con este enfoque crecieron las críticas hacia el positivismo, ya que se consideraba que éste último no explicaba el proceso histórico de los cambios científicos (Pfeifer y Sarkar, 2016).

Dentro del empirismo lógico se veía a las teorías como un conjunto de leyes axiomáticas y reglas de correspondencia expresadas en términos de lenguajes formales. Esta conceptualización tomó como ejemplo a la física y sus opositores argumentaron que esta visión afecta el entendimiento de otras disciplinas científicas. Por lo anterior, en la década de 1960, se hicieron diversas propuestas que se englobaron lo que hoy se conoce como la “visión semanticista” que propone ver a las teorías científicas como familias de modelos. El semanticismo se presentó como una propuesta que a diferencia del empirismo lógico, tomaba en cuenta las prácticas de los científicos y dentro de esta propuesta se desarrollaron dos formas de analizar los modelos dentro de la ciencia. Por un lado, el análisis que elevó epistemológicamente a los modelos por encima de las teorías, a las cuales considera formadas por familias de modelos. La otra forma de estudiar a los modelos tiene un corte más histórico y consiste analizar los modelos conforme se desarrolló la ciencia. Con este tipo de desarrollo se encontró que existen diversos tipos de modelos con diferentes funciones, lo cual derivó en una taxonomía de los modelos : a partir de datos, materiales (por ejemplo el modelo de la doble hélice del ADN), teóricos, matemáticos, etc. (Pfeifer y Sarkar, 2016)

Al interior de la visión semanticista de la ciencia confluyen varias posturas epistemológicas que van del realismo al antirealismo científico. El primer caso se basa en la tesis de que las entidades no observables, postuladas en las teorías empíricamente exitosas, existen incluyendo las propiedades que se les atribuyen. Mientras que con el antirealismo se afirma que el éxito de las teorías para explicar y predecir sólo da cuenta de la utilidad de lo que se postule, y no garantiza su existencia (Leplin, 2016). Esta discrepancia es una discusión metafísica entre ambas posturas y en el presente trabajo se asume una postura intermedia del antirealismo (la que propone van Fraassen denominada como empirismo constructivo). Para el empirismo constructivo lo observable está relacionado con la comunidad epistémica para la cual las teorías científicas son su tema de interés. Es decir, que aquello que se considere observable dependerá de la comunidad científica. (Monton y Mohler, 2017).

Frigg y Hartmann (2016) mencionan que la visión de modelos favorece más a la postura anti realista respecto a su contraparte realista. Dichos autores mencionan que la postura anti realista asegura que la finalidad que persiguen los científicos al modelizar no es conocer la verdad ya que

en ocasiones los científicos usan modelos que son falsos e incompatibles de forma simultánea para explicar un mismo fenómeno. Como ejemplos se pueden mencionar los modelos para explicar el comportamiento de los gases o los distintos modelos del átomo para explicar diversos fenómenos atómicos.

Como ya se mencionó, dentro del semanticismo confluyen posturas realistas, anti realista y posturas intermedias que tienen en común que las teorías no son sistemas lingüísticos axiomatizados y más bien son una familia de modelos que las conforman a ellas. Como argumentos para apoyar el enfoque semanticista se puede mencionar que: las teorías son entidades que se pueden describir con diversas formulaciones lingüísticas, es decir que una formulación particular no afectará el contenido de la teoría; es más sencillo aplicar este enfoque para teorizar en la ciencia; es compatible con cualquier corriente epistemológica de la ciencia dentro del realismo, empirismo o instrumentalismo, y finalmente el semanticismo ofrece la posibilidad de incorporar varios usos que se hacen en la práctica científica de la palabra modelo (Lloyd, 2016).

Lloyd (2006) plantea que originalmente Patrick Suppes con sus trabajos de 1957 y 1967 desarrolló esta visión y posteriormente otros autores continuaron el avance de esta propuesta, van Fraassen en sus trabajos de 1970 y 1972, Frederick Suppe en 1977 y Ronald Giere en 1988. En el presente trabajo se propondrá una declaración acerca de lo que es un modelo a partir de los trabajos de Giere, van Fraassen, y se complementará con aspectos del semanticismo que se mencionan en Pfeifer y Sarkar (2006), Leplin (2006), Lloyd (2006), Frigg y Hartmann (2006) y Gilbert, Boulter y Elmer (2000).

En primer lugar, van Fraassen (1972) menciona que “el trabajo esencial de una teoría científica es proveernos de una familia de modelos, para ser utilizados en la representación de un fenómeno empírico” (p. 310). Ante esto Lloyd (2006) señala que surge la necesidad de definir lo que es un modelo y menciona que éstos son una interpretación que hace verdaderas las afirmaciones de una teoría, luego van Fraassen (1989) aclara que “un modelo consiste, formalmente hablando de entidades y relaciones entre dichas entidades” (p. 365).

Por otro lado Giere (1988) define a un modelo como una estructura y al mismo tiempo una inter-



pretación de los fenómenos; en ella la relación entre los modelos y el objeto o fenómeno a modelizar es de similitud, en aspectos particulares y con cierto grado, ya que al hacer uso y al construir modelos científicos existe una idealización que permite eliminar aspectos del fenómeno que no son relevantes para su explicación. Los modelos entendidos como modelos teóricos “se pretende que sean modelos de algo, (y) ellos funcionan como ‘representaciones’ en un sentido general” (Giere, 1988, p. 80). Además Giere (1988) señala que dichos modelos sirven a los científicos para representar el mundo, para ellos mismos y para comunicarlos a otras personas.

Para entender la relación entre los modelos teóricos y el objeto a modelar Giere (1988) afirma que se requiere “introducir un nuevo concepto, el de hipótesis teórica” (p. 80), concepto que asegura se superpone con el que utilizan los científicos. Las hipótesis teóricas según Giere (1988) son entidades lingüísticas que afirman la relación entre el modelo y el objeto a modelizar y, éstas son verdaderas o falsas dependiendo de si las afirmaciones se cumplen o no al utilizar el modelo para representar el fenómeno, con la finalidad de explicarlo. Las hipótesis hacen posible la relación de similitud, en cierto grado, entre los modelos y el objeto a modelizar y “dichas afirmaciones están vacías si no se especifican las consideraciones y grados [de validez]” (Giere, 1988, p. 80). Además Giere (1988) menciona que al afirmar la validez de una hipótesis se asegura que dicha similitud existe, la cual es indirecta en el sentido de que dicha relación se establece entre un objeto abstracto y otro real, ver figura (2.1).

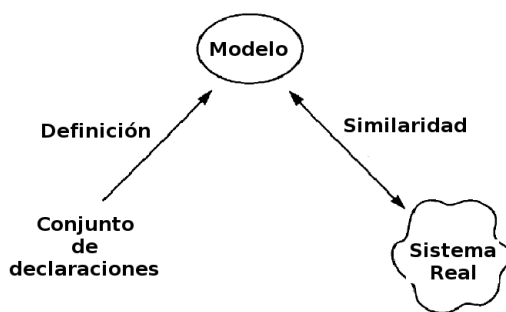


Figura 2.1: “Relaciones entre el conjunto de afirmaciones, modelos y sistemas reales” (Giere 1988, p.83).

Por otra parte Frigg y Hartmann (2006) señalan algunos aspectos importantes, para entender a los modelos y su uso. (a) Comenzando con la ontología de los modelos (para determinar qué son y

cómo se conforman), los cuales pueden ser objetos físicos a los que se les conoce como modelos materiales -como es el caso de un modelo a escala de un objeto-, también puede haber modelos abstractos, que son idealizaciones dentro de la mente de los sujetos, a los cuales Gilbert, Boutler y Elmer (2000) denotan como modelos mentales, estos autores también distinguen a los modelos científicos, que son aquellos modelos aceptados por la comunidad científica.

(b) El siguiente aspecto a considerar es la epistemología de los modelos para comprender como conocemos mediante su uso; en este sentido Hughes (2012) distingue tres etapas con las cuales se puede generar conocimiento acerca de los fenómenos de la naturaleza, la primera etapa es la **denotación**, donde se establece la relación entre el modelo y el objeto o fenómeno a modelizar, es a partir de esta relación que se denotan las entidades que componen al fenómeno; posteriormente en la etapa de **demonstración** se analizan las características del modelo para corroborar las afirmaciones teóricas sobre el funcionamiento o la constitución del modelo, y por último en la etapa de **interpretación** los hallazgos se convierten en afirmaciones sobre el modelo, de modo que se genera conocimiento acerca del objeto o fenómeno mediante la relación de similitud que existe entre el modelo y el fenómeno u objeto; tal relación depende de las hipótesis teóricas postuladas. Es necesario señalar que al conocer mediante modelos hay dos componentes de gran relevancia, la construcción de modelos y la manipulación de los mismos, en este proceso no hay reglas o procedimientos estandarizados, por lo que se podría decir que la construcción de un modelo es un “arte y no un procedimiento mecánico” (Frigg y Hartmann 2006, p. 746), más bien es en el proceso de hacer encajar las explicaciones producidas con los modelos, a las observaciones de los fenómenos naturales, que se aprende y se construye conocimiento.

(c) Por último, sobre el aspecto para entender a los modelos en relación con las leyes de la naturaleza, se debe considerar en primer lugar que dentro de la visión semanticista las leyes no postulan hechos acerca del mundo, sino más bien se considera que éstas gobiernan a las entidades y procesos dentro de un modelo, en segundo lugar la explicación de un fenómeno no se hace directamente con el uso de las leyes sino que se asigna esta función a los modelos, esto es, “se explica un fenómeno mediante la construcción de un modelo que encaja el fenómeno en el marco de una teoría y en este

sentido el modelo es por sí mismo la explicación que se busca” (Frigg y Hartmann, 2006, p. 748).

### 2.1.1. Síntesis propuesta sobre la concepción de modelo

En el presente trabajo se hará uso de los modelos dentro del marco de la Educación en Ciencias, es por eso que se necesita dar una declaración de lo que se entenderá por modelo y por modelización. En relación a los modelos se presenta a continuación dicha declaración que sintetiza los elementos expuestos en la sección anterior, y que será de utilidad para cuestiones operativas dentro del diseño de la Estrategia Didáctica.

Por un modelo se entenderá lo siguiente:

1. Retomando el planteamiento de Giere (1988) un modelo es una estructura para representar fenómenos naturales y una interpretación de los mismos. La representación se lleva a cabo mediante una relación de similitud entre el objeto o fenómeno a modelizar y el modelo mismo (figura 2.1). En ella se idealiza el objeto o fenómeno con la intención de simplificar el modelo, eliminando aspectos irrelevantes para poder determinar las características esenciales que permitan explicar el fenómeno. El grado de validez de un modelo dependerá de la hipótesis teóricas que se hagan para elaborarlo y simplificarlo, además del grado en que se cumplan éstas para poder hacer la representación y explicación del fenómeno.
2. Se deben señalar algunos aspectos que clarifican y hacen posible operar con los modelos, en primer lugar se considerará que un modelo tiene dentro de sus componentes a las *entidades* y las *relaciones* (van Fraassen, 1989). Las entidades propuestas tienen las *propiedades* que se les atribuye en la teoría y ellas pueden tener o no un estatus ontológico, cabe aclarar que aún cuando no lo tengan no dejan de ser útiles para explicar un fenómeno por medio de modelos científicos. Puede suceder que dichas entidades no sean observables en determinado momento y posteriormente sean corroboradas o desechadas debido a que los métodos de observación evolucionan (Leplin, 2006).
3. Otro aspecto relevante para el manejo y manipulación de los modelos es su relación con las

leyes de la naturaleza, las cuales gobiernan a las entidades y los procesos dentro del modelo (Frigg y Hartmann, 2006), a este elemento se le denotará de forma general como *reglas de inferencia* y en el también se considerarán principios (por ejemplo los principios de conservación en la física). Por último es necesario considerar las *condiciones* bajo las cuales un modelo pueda aplicarse o ser útil, para ello se retoma lo que Giere (1988) menciona acerca de las hipótesis teóricas: con ellas se establece la relación de similitud entre el modelo y el objeto a modelizar, dichas relaciones carecen de sentido si no se explicitan sus condiciones y grados para que sean válidas.

Si se utiliza la declaración anterior de lo que es un modelo, es posible dar un ejemplo con la intención de dejar claro lo que se entiende por *entidades, propiedades, relaciones, reglas de inferencia y condiciones*. El fenómeno que ayudará en este ejemplo consiste en la caída libre de una piedra, desde una altura dada.

- Las *entidades* serán: (1) piedra y (2) la Tierra.
- *Propiedades*: masa de la piedra y de la Tierra.
- *Relaciones* entre las entidades: se atraen mutuamente.
- Las *condiciones* son: no hay fricción, no hay otros cuerpos presentes que tengan masa -o bien las interacciones gravitacionales entre la piedra y otros cuerpos que no sean la Tierra son despreciables-; la piedra y la Tierra se consideran como masas puntuales, la atracción de la piedra sobre la Tierra es despreciable, no así la atracción de la Tierra sobre la piedra.
- *Reglas de inferencia*: las leyes de Newton y la ley de la gravitación universal.

Una vez que se identificaron las *entidades*, sus *propiedades* y *relaciones* es posible comenzar a construir el modelo que pueda representar el fenómeno, explicarlo y además hacer predicciones de su comportamiento. Dependiendo de las *condiciones* que restrinjan al modelo, éste podrá ser sencillo o muy complicado; por ejemplo suponiendo que no hay fricción o disipación de energía se puede

simplificar el problema, al usar fuerzas conservativas y aplicar el principio de conservación de la energía (*reglas de inferencia*).

También se puede considerar que únicamente intervienen dos masas (Tierra y piedra), sin importar la presencia de otras. De este modo el problema se simplifica bastante, ya que la fuerza de atracción depende únicamente de los dos cuerpos (piedra y Tierra) y la representación matemática del modelo se puede hacer en una sola dimensión. Otra forma de simplificar el problema es considerar que la fuerza de atracción gravitacional de la Tierra sobre la piedra es mucho mayor que la atracción de la piedra sobre la Tierra; con esta suposición es posible considerar que la Tierra permanece fija y la piedra se mueve hacia el centro de la Tierra -la cual se puede considerar esférica y con una densidad constante.

A su vez se puede descartar el movimiento rotacional de la Tierra, el cual tiene como consecuencias la fuerza de Coriolis, que deja de ser despreciable en la caída de objetos a grandes alturas. Por último con las *reglas de inferencia*, leyes de Newton y la ley de la gravitación universal, podremos describir la dinámica de la caída y hacer predicciones sobre el tiempo de caída, la velocidad final, etc.

No se desea profundizar en el modelo que se da como ejemplo, ya que la intención principal es mostrar como se opera con la declaración acerca de los modelos. Más adelante en el trabajo se abordará un fenómeno enmarcado dentro de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), y en ese caso se hará un análisis más detallado, tomando como guía la declaración de modelo expuesta líneas arriba.

En las siguientes secciones se presentarán los elementos que permiten entender el proceso de modelización, mediante el cual se construyen los modelos científicos. En el presente trabajo se espera que los alumnos construyan sus modelos, en un proceso donde sus modelos sean cada vez más cercanos a los de la ciencia erudita. Esta actividad se desarrollará específicamente en el aula y se usará como guía la propuesta que se expone en la siguiente sección sobre el proceso de modelización.

## 2.2. MODELIZACIÓN: CONSTRUCCIÓN Y MANEJO DE MODELOS

En la sección anterior se presentó una síntesis de lo que se entiende por modelo, la cual hace operativo su uso en la clase de ciencias, ya que se parte de identificar un fenómeno, las entidades que son relevantes en él, las cuales posteriormente se caracterizan con las propiedades que les asignan las teorías. Por otro lado, para comprender los mecanismos que intervienen en el fenómeno es necesario establecer las relaciones entre las entidades identificadas y, la formalización del modelo se logra mediante las reglas de inferencia, que son válidas bajo ciertas condiciones o suposiciones que se establecen al construir y utilizar los modelos, es muy importante señalar que lo anterior dependerá de los objetivos que los usuarios persigan. Por ejemplo en ocasiones los científicos hacen uso de modelos limitados (dependiendo de sus objetivos); pero en tal caso mantienen presentes las restricciones de éstos, en este sentido es el uso pragmático lo que distingue a los estudiantes de ciencia de los expertos, ya que los primeros no necesariamente reconocen el hecho de que los modelos tienen un rango de validez y que éstos requieren modificaciones según surgen nuevas evidencias experimentales (Coll y Lajium, 2011).

Los modelos y la modelización desempeñan un papel tanto en la ciencia como en la educación de las ciencias. De acuerdo con Coll y Lajium (2011), los propósitos de la modelización en las ciencias son: (a) producir representaciones simples de los objetos o fenómenos, de modo que se eliminen sus aspectos no relevantes y sólo se mantengan los más importantes, lo anterior es una cualidad de los modelos que permite centrarse en los aspectos claves del fenómeno a estudiar; (b) tener conocimiento acerca de los fenómenos y, (c) explicarlos desde un punto de vista científico. Además debemos recordar lo que se mencionó en la sección 2.1.1, que los modelos sirven a los científicos para representar el mundo y para comunicar sus representaciones a otras personas (Giere, 1988).

### 2.2.1. Síntesis propuesta sobre el proceso de modelización: elementos para su desarrollo en el aula

Izquierdo, Espinet, García, Pujol y Sanmartí (1999) denominan como ciencia escolar a las prácticas dentro del aula, las cuales difieren a las de los científicos. Dichas prácticas deben ser planificadas con la finalidad de lograr que éstas sean significativas para los estudiantes y para conseguir que ellos se vuelvan aprendices autónomos, esto último se propone realizarlo mediante el uso de procesos de autorregulación, junto con el uso de la argumentación en la construcción del conocimiento de los alumnos. Lo anterior servirá de referente para el presente trabajo, ya que en primer lugar se propone una estrategia didáctica que tiene como fin la planificación de las actividades dentro del aula para la enseñanza de la Teoría de la Relatividad Especial. Por tal razón, a continuación se discutirán aspectos del proceso de modelización en el aula y algunos elementos de la metacognición y la argumentación; más adelante en el diseño de la estrategia didáctica se retomará lo aquí expuesto para vincular todos los elementos antes mencionados.

Coll y Lajium (2011) mencionan que los estudiantes no logran apreciar la función principal de los modelos en la ciencia, como constructo para la comprensión o explicación de fenómenos, ya que dicho proceso se ve influenciado por la epistemología que los alumnos tengan, además de sus ideas sobre su naturaleza y la modelización en la ciencia, por tal razón es recomendable considerar estos aspectos dentro del aula; también es útil que los profesores comprendan y analicen los modelos de los estudiantes junto con sus ideas sobre el proceso de modelización. En ese sentido Justi y Gilbert (2002), con la intención de facilitar la enseñanza basada en la modelización, proponen un esquema de la modelización que se muestra a continuación

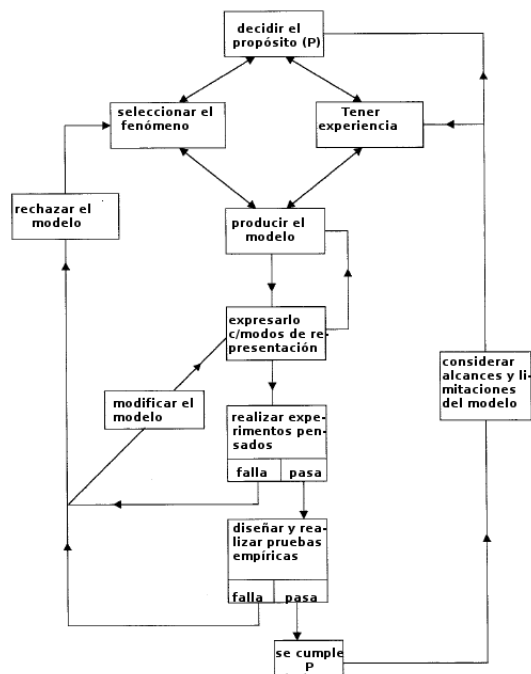


Figura 2.2: Esquema del proceso de modelización (Justi y Gilbert, 2002, p. 371).

Justi y Gilbert (2002) describen a la modelización como un proceso cíclico, donde primero se establecen los propósitos que guiarán este proceso, ya sea que se desee describir un fenómeno de la naturaleza, o bien establecer únicamente las entidades que formarán parte del modelo, también es posible que se deseen conocer las causas que subyacen a éste, o predecir su comportamiento bajo ciertas circunstancias. Los autores también mencionan que al modelizar, se puede construir (o reconstruir) un modelo ya existente, aceptado por la comunidad científica. Lo anterior correspondería, por ejemplo, al proceso que se desarrolla durante la formación de los estudiantes de ciencias. También puede suceder que una persona desee construir un modelo nuevo, según los propósitos que tenga.

Según los propósitos que se tengan, se podrá elegir alguna situación que enmarque el fenómeno a modelizar. Además los propósitos guiarán los primeros acercamientos, que podrán ser directos al realizar un experimento o estudiándolo de forma indirecta, o bien con un acercamiento cuantitativo o cualitativo. Con los dos aspectos anteriores es posible iniciar la construcción del modelo y en este momento será necesario decidir la forma que se empleará para expresarlo, ya sea de forma



matemática, verbal o visual. Se puede decir que hay una interrelación entre la producción del modelo y su expresión, por lo que en esta etapa se considera que existe un desarrollo cíclico del modelo (Justi y Gilbert, 2002).

Una vez que se tiene el modelo es posible considerar las posibilidades que este permite englobar sobre el fenómeno, es decir que se pueden realizar predicciones y analizar si tendrían sentido. Lo anterior se puede realizar imaginando posibles resultados que permitan explicar el fenómeno, al utilizar el modelo (experimento pensado). Cuando el modelo pasa la prueba anterior es factible comenzar a diseñar el arreglo experimental para realizar las pruebas empíricas que corroboren o refuten las hipótesis hechas con el modelo para explicar y predecir el fenómeno, dependiendo de los objetivos fijados. En caso de que se refute al modelo construido por el sujeto, se podrá modificar el modelo o rechazarlo y recomenzar nuevamente el proceso (Justi y Gilbert, 2002).

Si después de realizar las pruebas experimentales el modelo es fructífero, esto es, que se cumplen las predicciones hechas por el modelo y se describe al fenómeno que se eligió, es posible analizar sus alcances y limitaciones del mismo, con lo cual se puede recomenzar el ciclo para analizar, si por ejemplo, es necesario considerar otras condiciones o aspectos para refinar y mejorar el modelo o para hacer más precisa la descripción del fenómeno (Justi y Gilbert, 2002).

El esquema anterior propuesto por Justi y Gilbert (2002) se complementará con la propuesta de Hughes (1997) que puede sintetizar a la anterior en tres etapas. Con esto se tendría un esquema ampliado y uno sintético que permite hacer más operativo el uso de la modelización dentro de la Educación en Ciencias. La propuesta de Hughes (1997) además permite agregar aspectos que enriquecen la imagen que se tendrá de la modelización, los cuales se describirán a continuación.

Hughes (1997) propone tres etapas para entender el proceso de modelización en el contexto de la física y en particular hace énfasis al uso de los modelos teóricos en este campo. Dichas etapas son las siguientes: denotación, demostración e interpretación.

La primera de ellas, denotación, es la etapa en donde se comienza a representar un modelo. En su exposición Hughes (1997) pone como ejemplo la representación que hizo Galileo para trasladar el fenómeno del péndulo a su representación geométrica, es decir, representó el movimiento periódico

con una descripción geométrica que le permitió ahondar en la explicación del fenómeno, ya que al interpretar sus resultados -que obtuvo geoméricamente- pudo describir la dinámica del movimiento y obtener relaciones que le permitieron concluir que el periodo de este movimiento oscilatorio es independiente de la masa del objeto.

Hughes (1997) hace énfasis en la representación matemática de los modelos, ya que en la física esta representación es de las más importantes, por que permite formalizar teóricamente lo que se sabe acerca del fenómeno y lo que se deduzca de su comportamiento. Hughes (1997) menciona que las representaciones matemáticas tienen una dinámica interna que permite hacer predicciones tanto de aspectos nuevos como de los que ya se conocen, dicha dinámica interna está provista por medio de los recursos deductivos de las matemáticas empleadas para la representación. Todas las representaciones de este tipo comparten una característica en común, "ellas contienen los recursos que nos permiten *demostrar* los resultados en los que estamos interesados" (Hughes, 1997, pp. 332). Además Hughes (1997) menciona que es posible *demostrar* los fenómenos físicos, o los aspectos que nos interesen de él, de forma experimental.

Hughes (1997) señala que con las conclusiones que se demuestran por medio del modelo tienen que ser *interpretadas* en términos del fenómeno que se está modelizando, y posteriormente es posible determinar si las conclusiones teóricas corresponden a él, y si la teoría se ajusta con las observaciones empíricas. En este sentido Hughes (1997) menciona que la interpretación sería el proceso inverso a la denotación.

A partir de la síntesis que se propuso para entender lo que es un modelo dada en la sección 2.1.1, junto con la síntesis de la modelización hecha a partir de los trabajos de Justi y Gilbert (2002) y Hughes (1997), se propone un esquema que conjuga lo más importante de estos tres aspectos. Lo anterior permitirá tener una idea clara acerca del proceso de modelización, que servirá de referente teórico para el diseño de la Estrategia Didáctica.

Enseguida se presenta el esquema sintético sobre la modelización: la modelización se entenderá como un proceso que de forma general tiene tres etapas, tomadas de Hughes (1997). Dentro de dichas etapas se incluirán los aspectos propuestos por Justi y Gilbert (2002) y lo que conforma a un

modelo, sección 2.1.1.

- **Denotación:** se debe tener contacto o experiencia con el fenómeno a modelizar y posteriormente se denotan las **entidades** que intervienen en el fenómeno; una vez hecho lo anterior se determinan sus **propiedades** y las **relaciones** posibles entre ellas. Debe mencionarse que desde esta primera etapa del proceso se toman en cuenta ciertas hipótesis para determinar que entidades son relevantes en el fenómeno, así como las propiedades y relaciones entre ellas que son de interés. En esta primera etapa se inicia la construcción del modelo y se busca establecer una primera relación de éste con el fenómeno. Además se deben considerar los propósitos para la construcción del modelo, ya sea para describir el comportamiento de un fenómeno, determinar las causas que lo generan y de este modo explicarlo en circunstancias específicas. Con esto se contempla la construcción de modelos cada vez más complejos o robustos, ya que inicialmente puede ser únicamente posible la descripción y conforme se avanza en la modelización, es posible explicar los fenómenos bajo ciertas hipótesis o condiciones más generales, o bien, si el interés es simplificar una explicación se puede optar por un modelo menos elaborado y de esto depende el propósito que se tenga.
- **Demostración:** se buscan corroborar las afirmaciones teóricas del modelo; éste debe ser expresado con la finalidad de facilitar su manipulación mental -por ejemplo con ayuda de experimentos pensados- para determinar las posibilidades que proporciona y encontrar sus posibles fallas. En caso de existir deficiencias, deben hacerse ajustes hasta eliminar las posibles inconsistencias teóricas y así poder dar paso a la experimentación empírica -la cual no siempre será posible realizar en el aula. Con la experimentación se pretenden probar las predicciones hechas por medio del modelo y en caso de no cumplirse será necesario adecuarlo a los resultados experimentales. Para los experimentos pensados, la búsqueda de las inconsistencias se hará haciendo uso de la teoría, que en nuestro caso será la Teoría de la Relatividad Especial. Es importante señalar que durante esta etapa de la construcción del modelo, las **reglas de inferencia** tienen un papel importante ya que con ellas es posible, tanto hacer predicciones como analizar las consecuencias de éstas, además que son ellas las que delimitan en gran medida al

modelo mismo.

- **Interpretación:** por último los hallazgos se convierten en afirmaciones sobre el objeto o fenómeno a modelizar de modo que se genera conocimiento de ellos a través de la relación de similitud, la cual depende de las hipótesis teóricas hechas para la construcción del modelo, en esta última fase se deberán determinar las limitaciones del modelo y reafirmar las **condiciones** en las que es válido, éstas están presentes desde la primera etapa del proceso, ya que al determinar por ejemplo las relaciones se establecen ciertas condiciones para el modelo. Determinar las limitaciones y condiciones se facilita si se comunica el modelo construido a una comunidad de pares y se propicia un proceso de argumentación para establecer el rango de validez del modelo, que puede aumentar al repetir el proceso.

Con la intención de clarificar lo anterior se presentará el esquema de la modelización en forma de cuadro (ver cuadro 2.1), donde se interrelacionan las tres fases (denotación, demostración e interpretación) con los aspectos de los modelos (entidades, propiedades, relaciones, reglas de inferencia y condiciones).

Por último se debe señalar que en el proceso de modelización no existen reglas o procedimientos estandarizados, por lo que se podría decir que la construcción de un modelo es un “arte y no un procedimiento mecánico” (Frigg y Hartmann 2006, p. 746), más bien es en el proceso de hacer encajar las explicaciones producidas con ellos, a las observaciones de los fenómenos naturales, que se aprende y se construye conocimiento. Además es necesario remarcar el papel que juegan los modelos en la comunicación y difusión del conocimiento científico, como menciona Justi Y Gilbert (2002), es mediante la construcción de modelos que se aprende a hacer ciencia y se enfatiza la importancia de los mismos en ella.

La esquematización propuesta tiene la finalidad de promover la modelización de forma consciente en los alumnos, de modo que sea posible detonar un proceso de metacognición en los estudiantes. En todo este proceso, esta implicada una constante evaluación del modelo, de sus alcances, rango de validez y de las condiciones en las que es posible aplicarlo, por ejemplo en la denotación

Cuadro 2.1: *Esquemmatización del proceso de modelización.*

Modelo	Denotación	Demostración	Interpretación
<b>Entidades, propiedades y relaciones</b>	Primer acercamiento al fenómeno, se denotan las <b>entidades</b> relevantes que intervienen en él, se establecen sus <b>propiedades</b> y las <b>relaciones</b> posibles entre ellas. En esta primera etapa se comienza a establecer la relación de similitud entre el modelo y el fenómeno.		Los hallazgos se convierten en afirmaciones sobre el fenómeno y se genera conocimiento de él a través de la <i>relación de similitud</i> con el modelo, la cual depende de las <i>hipótesis teóricas</i> hechas para su construcción.
<b>Reglas de inferencia</b>		Se expresa el modelo para facilitar su manipulación. Se buscan corroborar las afirmaciones teóricas del modelo producido, y encontrar las inconsistencias del mismo con la teoría ( <b>reglas de inferencia</b> ), posteriormente se da paso a la comprobación de las predicciones del modelo mediante experimentos.	Se puede pensar que la interpretación tiene lugar en los distintas fases del proceso de modelización, ya que para determinar las <b>entidades</b> , sus <b>propiedades</b> y <b>relaciones</b> , se lleva un proceso gradual en el que se van refinando, de modo que los modelos son cada vez más complejos y al repetir el proceso se hacen afirmaciones sobre el fenómeno.
<b>Condiciones</b>	Se deberán determinar las limitaciones del modelo, o el rango de validez del mismo. Las condiciones del modelo están presentes desde el inicio del proceso, cuando se comienza a la denotación y ellas se deben tener presentes en la demostración. También forman parte de la interpretación ya que las conclusiones que se obtengan acerca del modelo dependerán de las condiciones que se hayan considerado inicialmente.		

Cuadro de construcción propia.

al establecer las entidades con sus propiedades y relaciones se toman en cuenta sólo las entidades más relevantes y se descartan otras, a partir de supuestos teóricos o condiciones que simplifican el modelo. Lo anterior también se aplica en la etapa de demostración, ya que las inconsistencias dependerán de los supuestos teóricos y de las condiciones adoptadas para el modelo. Finalmente en la interpretación se pueden ampliar las condiciones de aplicación así como de validez para que las explicaciones sobre el fenómeno sean cada vez más precisas.

## **2.3. Aportación para interrelacionar la argumentación y metacognición en la modelización**

A continuación se presentan dos aspectos que serán de gran importancia para el diseño y evaluación de la Estrategia Didáctica, estos son la metacognición y la argumentación. Por una lado la metacognición involucra procesos de autoevaluación por parte de los alumnos acerca de su aprendizaje, con lo que se fomenta el aprendizaje autónomo de los estudiantes; por otra parte la argumentación necesaria para la producción del conocimiento científico, sin duda es una práctica de los científicos experimentados, que se debe promover en el aula para que todos los estudiantes desarrollen esa habilidad como parte de su formación.

### **2.3.1. Metacognición**

Según Anderson, Nashon y Thomas (2009) el significado del concepto de metacognición varía según el paradigma de investigación al que se adhieran los investigadores y no hay una definición uniforme de la metacognición en la literatura; por otro lado Jacobs y Paris (1987, citado en Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012) mencionan que generalmente se elude definir este concepto.

Por otro lado Anderson, Nashon y Thomas (2009) establecieron dos grandes categorías dentro de las que se pueden clasificar las investigaciones sobre metacognición, dependiendo del paradigma

al que se adhiera cada investigación: por un lado está el paradigma positivista descontextualizado que emplea principalmente análisis estadísticos y se distancia de los factores contextuales que puedan afectar dicho proceso; por otro lado el paradigma relativista contextualizado considera que se deben tomar en cuenta factores como el ambiente de aprendizaje y plantea que el papel de los docentes debe ser relevante en su desarrollo. El método relativista contextualizado emplea varios modos para obtener distintos tipos de datos con la idea de triangular información y así obtener conclusiones sólidas sobre este fenómeno (Anderson, Nashon y Thomas, 2009).

Dentro de las conceptualizaciones más utilizadas de la metacognición se menciona que está constituida por dos componentes: el conocimiento sobre el propio aprendizaje, también llamado proceso de cognición, y la autorregulación del mismo (Veenman y Van Hout-Wolters, 2006; Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Yilmaz-Tüzün, Özgül y Topcu, 2010; Grotzer y Mittlefehldt, 2012; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012).

El conocimiento sobre el propio aprendizaje hace referencia al conocimiento que cada sujeto tiene de su proceso de aprendizaje o proceso de cognición, sobre los factores que afectan su desempeño, el conocimiento de las estrategias y procedimientos para el aprendizaje o bien de las razones de utilizar alguna estrategia particular en alguna parte del proceso. En el proceso de cognición se considera que los individuos hacen uso de estrategias para aprender, como la formulación de preguntas, para resolver problemas y de habilidades de pensamiento crítico con las que es posible identificar fuentes de información y determinar si ésta es consistente con el conocimiento científico previo (Schraw, Crippen y Hartley, 2006). Cabe señalar que se ha encontrado que los estudiantes, incluyendo los de nivel universitario, tienen pocas habilidades para argumentar y hacer uso del pensamiento crítico (Schraw, Crippen y Hartley, 2006), lo que hace destacar la importancia de abordar estos aspectos en la enseñanza de todos los niveles educativos.

Por otro lado, en la regulación se encuentran aspectos como la planificación para elegir estrategias, la determinación de los objetivos al iniciar una actividad, la activación del conocimiento previo o la administración del tiempo, además se considera que en la regulación interviene el automonitoreo del proceso de aprendizaje y la evaluación del mismo, así como de las habilidades que se tengan

para controlarlo (Veenman, Van Hout-Wolters, 2006; Schraw, Crippen y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009; Grotzer y Mittlefehldt, 2012; Herscovitz, Kaberman, Saar, y Dori, 2012) y la autorreflexión sobre el proceso mismo. Un factor importante para la regulación del aprendizaje es la motivación (Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012) que tengan los individuos, ya que según sea su percepción de la eficiencia que tienen, mayor será su seguridad para involucrarse en tareas complejas y su persistencia aumentará aunque se encuentren con dificultades (Schraw, Crippen y Hartley, 2006).

Por otro lado, al revisar diversos artículos de investigación sobre metacognición, en el ámbito de la Educación en Ciencias, se encontró que la indagación científica interrelaciona los siguientes aspectos: pensamiento crítico; argumentación; generación de preguntas; elaboración y prueba de hipótesis; evaluación y autorreflexión (Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Yilmaz-Tüzün y Topcu, 2010; White, Frederiksen, y Collins, 2009; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012). Además es importante apuntar lo que White, Frederiksen y Collins (2009) señalan: “para involucrarse exitosamente en la indagación científica se requiere desarrollar capacidades metacognitivas” (p. 176).

La indagación científica se entiende como el proceso en el cual, a partir de la teoría se generan preguntas acerca del mundo e hipótesis para responderlas, para ello se debe buscar algún tipo de evidencia que sirva de soporte (Schraw, Crippen, y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009). Se postula que este proceso está formado por distintos tipos de meta-conocimiento y habilidades: visualización de la indagación científica como un proceso, el cual mediante la confrontación de argumentos permite el desarrollo y prueba de modelos científicos y teorías; conocimiento acerca de la naturaleza de los modelos y las teorías científicas; plantear preguntas y elaborar hipótesis con la finalidad de evaluar los modelos y las teorías científicas; investigar mediante algún método de investigación, que puede ser inductivo o deductivo, de forma consciente; analizar y representar los datos obtenidos para construir argumentos que confirmen o permitan introducir nuevas hipótesis de investigación, así como la generalización de los resultados; además se debe considerar que es necesario el autocontrol del proceso de indagación, es decir de los elementos antes mencionados junto con el manejo de los objetivos de la investigación y las estrategias para llevarla a cabo (White, Frederiksen



y Collins, 2009).

Es posible promover la enseñanza de la metacognición en el aula al incorporarla con el conocimiento de las disciplinas científicas (física, química, biología, etc.) de forma explícita y prolongada, para que los estudiantes sean conscientes de lo que se desea que aprendan; también se propone promover el aprendizaje basado en la indagación, la colaboración en el aula, el uso de discusiones grupales, el uso de modelos, y fomentar la autorregulación en los estudiantes, lo cual puede lograrse si se proveen oportunidades para la reflexión y la autoevaluación, por lo que es importante brindar a los estudiantes retroalimentación (Veenman, Van Hout-Wolters y Afflerbach, 2006; Schraw, Crippen, y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009). Promover la metacognición en la educación en ciencias es de gran importancia por que fomenta la práctica de la indagación científica por parte de los estudiantes, ayuda a mejorar la comprensión tanto de la naturaleza de la ciencia como de los métodos que emplea, además promueve la autorregulación de los estudiantes y los ayuda a desarrollar autonomía (White, Frederiksen y Collins, 2009).

Según Veenman, Van Hout-Wolters y Afflerbach (2006) existen diversas formas para obtener evidencias del proceso de metacognición, y determinar los resultados de la enseñanza con este enfoque. Las posibles formas de obtener los datos es mediante el uso de cuestionarios, protocolos de análisis de pensamiento en voz alta, entrevistas, observación, recuerdo estimulado, entre otras. Los diferentes métodos tienen sus ventajas y desventajas, por ejemplo el uso de cuestionarios es útil para aplicar con grupos grandes, pero los resultados que arrojen éstos no necesariamente corresponde al comportamiento de los estudiantes durante la ejecución de una tarea; por otro lado las entrevistas y los protocolos de pensamiento en voz alta sólo se pueden aplicar de forma individual, lo cual puede ser una limitante en términos de la cantidad de datos que se puedan recabar (Anderson, Nashon y Thomas, 2009). Por otro lado la interacción grupal es un método efectivo para revelar el proceso de metacognición, el cual es más difícil de detectar de forma individual, y se puede registrar con grabaciones de video, de audio, muestras del trabajo de los estudiantes (Grotzer, y Mittlefehldt, 2012). Las discusiones grupales promueven la metacognición, el uso del pensamiento crítico, la reflexión y la autorregulación por la presencia de pares (Anderson, Nashon y Thomas, 2009, Grotzer, y Mittle-

fehldt, 2012) y se recomienda su uso como diálogo socrático para promover los elementos antes mencionados (Grotzer y Mittlefehldt, 2012).

### 2.3.2. Argumentación

Para entender lo que es la argumentación es necesario diferenciar lo que es una explicación, un argumento y la argumentación en sí (Driver, Newton y Osborne, 2000; Sampson y Clark, 2009; Erduran, Simon y Osborne, 2004; Berland & Reiser, 2009; Berland y Reiser, 2009). En las ciencias se buscan explicar del modo más completo posible los fenómenos naturales, con el requerimiento de que ellas tengan consistencia con las evidencias experimentales y las teorías científicas disponibles (Sampson y Clark, 2009; Berland y Reiser, 2009). Se dice que las explicaciones de los fenómenos se obtienen a partir de los modelos científicos, y se construyen en un proceso en el que interviene la comunidad mediante cuestionamientos y evaluaciones a estas (Berland y Reiser, 2009).

Las explicaciones y la argumentación son aspectos complementarios en la práctica científica, ya que al explicar un fenómeno se hace uso de argumentos para persuadir a los pares, en este sentido la argumentación hace posible construir explicaciones más robustas para que sean aceptadas por la comunidad (Berland y Reiser, 2009). La argumentación se puede entender como el proceso en el que se construyen argumentos y se evalúan, se analiza el proceso de investigación y sus productos (Sampson y Clark, 2009). Por otro lado, los argumentos se pueden conceptualizar de varias formas, una de las propuestas más aceptadas es la de Toulmin que propone como componentes de un argumento: datos para soportar las afirmaciones que se hagan, justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones, y respaldo para apoyar ciertas justificaciones, además se incluyen cualificadores para especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera, y refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple (Driver, Newton y Osborne, 2000; Sampson y Clark, 2009; Erduran, Simon y Osborne, 2004).

Entre las contribuciones de la argumentación en las clases de ciencias se puede mencionar que esta práctica contribuye al soporte de los procesos de metacognición y permite llevar a cabo el proceso de modelización al discutir los modelos en una comunidad de pares; coadyuva al desarrollo de

competencias comunicativas; posibilita aprender las prácticas que realizan los científicos y fomenta la evaluación racional de modelos y explicaciones (Jiménez-Aleixandre y Erduran, 2007). Por lo anterior es importante considerar y promover la argumentación en la enseñanza de las ciencias, debido a que hace posible involucrar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje. La promoción de esta práctica en el aula ayuda a explicitar el pensamiento y razonamiento de los estudiantes para su evaluación. Es importante señalar que para poder introducir la argumentación en el aula se requiere un cambio en la naturaleza normativa del discurso en el salón de clase y de la adopción de diseños instruccionales que permitan a los estudiantes trabajar colaborativamente (Osborne, Erduran y Simon, 2004).

Para promover la argumentación en el aula de ciencias se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos: que los alumnos trabajen en problemas que tengan relación con la recolección de evidencia y el manejo de datos, donde los estudiantes tengan un papel activo en su propio aprendizaje; involucrar a los estudiantes en el pensamiento reflexivo y en procesos metacognitivos con la intención de alentarlos a que comparen sus ideas con posturas alternativas; el uso de la argumentación en periodos de tiempo amplios y que los profesores brinden soporte a los estudiantes para que desarrollen la argumentación y proporcionar criterios para poder evaluar el conocimiento (Jiménez-Aleixandre, 2007).

### 2.3.3. Modelización (metacognición $\Leftrightarrow$ argumentación)

Gracias a la búsqueda bibliográfica y a la síntesis que se realizó en las dos secciones anteriores, se cuenta con una fundamentación teórica sólida que permite clarificar lo que es la metacognición y la argumentación. A continuación se presentan dos cuadros que resumen los aspectos más importantes que se considerarán sobre la metacognición y la argumentación, y posteriormente se sintetizarán en un cuadro que permita trabajar ambos aspectos en el proceso de modelización. Dicho cuadro servirá como guía para el diseño de estrategias didácticas y como instrumento para evaluar el uso de la argumentación y metacognición en el aula.

Los aspectos más importantes acerca de la metacognición se muestran a continuación en el

cuadro (2.2), los cuales están ordenados de los más concreto (izquierda) a lo más general (derecha), de forma análoga se muestran los aspectos más relevantes de la argumentación en el cuadro (2.3), tomando en cuenta las distinciones hechas entre argumento, argumentación y explicación expuesta en las secciones 2.2 y 2.3, respectivamente.

Cuadro 2.2: Aspectos para desarrollar la metacognición .

Metacognición			
Determinación de los objetivos al iniciar una actividad.	Autorregulación del proceso de aprendizaje.	Administración del tiempo.	Motivación
Formulación de preguntas.			
Activación del conocimiento previo.			
Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes.	Estrategias de aprendizaje.	Automonitoreo y evaluación del proceso de aprendizaje.	
Elaboración y prueba de hipótesis.			
Búsqueda de evidencias que sirvan de soporte.			
Construcción y confrontación de argumentos.	Planificación para elegir estrategias.	Autoreflexión.	
Representación de los datos obtenidos.			
Generalización de los resultados.			

Cuadro de construcción propia.

Cuadro 2.3: Elementos de la argumentación y la explicación en la ciencia.

Argumento.	Argumentación.	Explicación.
Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas.	Manejo de datos.	Explicar del modo más completo posible los fenómenos naturales. Las explicaciones deben ser consistentes con las evidencias experimentales y con la teoría, éstas se obtienen a partir de los modelos científicos y se construyen en un proceso en el que interviene la comunidad, mediante cuestionamientos y evaluaciones.
Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones.	Pensamiento reflexivo.	
Respaldo para apoyar ciertas justificaciones.		
Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera.	Interviene en procesos metacognitivos.	
Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple.	Comparar ideas con posturas alternativas.	

Cuadro de construcción propia.

A continuación se relacionarán los aspectos de la metacognición y la argumentación resumidos en los cuadros (2.2) y (2.3) con la síntesis que se propuso acerca del proceso de modelización, la cual se expuso en la sección 2.2.1. Para lograr lo anterior se utilizará el cuadro (2.1) y sobre él se indicará que aspecto de la metacognición y la argumentación se pone en juego. En el cuadro se denotaran con (M) a los aspectos que pertenecen a la metacognición y con (A) a los que pertenecen a la argumentación.

Cuadro 2.4: Propuesta para interrelacionar la metacognición y argumentación en la modelización.

Modelización		
<b>(M) Autorregulación, planificación de estrategias, administración del tiempo, automonitoreo, motivación y (M,A) autorreflexión.</b>		
<b>(M) Determinación de los objetivos, formulación de preguntas, activación del conocimiento previo,</b>		
Denotación	Demostración	Interpretación
entidades, propiedades, relaciones.	reglas de inferencia	reglas de inferencia, afirmaciones sobre el fenómeno
<b>(M) Activación del conocimiento previo,</b> <b>(M) Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes.</b>  <b>(M) Elaboración y prueba de hipótesis.</b>	<b>(M) Construcción y confrontación de argumentos.</b> <b>(M, A) Representación y manejo de los datos obtenidos.</b>  <b>(M, A) Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas.</b> <b>(A) Respaldo para apoyar ciertas justificaciones.</b>	<b>(M) Generalización de los resultados.</b> <b>(A) Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones.</b> <b>(A) Comparen sus ideas con posturas alternativas.</b> <b>(A) Explicación.</b>
<b>Condiciones, afirmaciones sobre el fenómeno, hipótesis teóricas.</b> <b>(A) Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera.</b> <b>(A) Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple.</b>		

Nota. La letra A denota que el elemento mencionado corresponde a un aspecto de la argumentación, mientras que la letra M denota a un elemento que corresponde a la metacognición. Cuadro de construcción propia.

Para trabajar los aspectos de la metacognición y la argumentación en el aula se debe hacer uso de discusiones entre pares, ya que los estudiantes desarrollan sus debates en el aula con mayor profundidad, en comparación a la situación de un debate entre el profesor y un alumno. En el primer caso es posible que en las discusiones entre estudiantes se detonen contradicciones entre sus explicaciones, ante lo cual surge la necesidad de resolverlas mediante el uso de estrategias como el trabajo conjunto, con la finalidad de encontrar soluciones plausibles para quienes participan en la discusión. También puede suceder que en el desarrollo de este tipo de actividad se aporten elementos que posiblemente algunos estudiantes ignoren y así se propicie homogeneizar la información en el grupo (Ladyshevsky, 2006). Es importante señalar que el uso de la metacognición se debe promover para que los estudiantes reconozcan las inconsistencias de los modelos que construyan para representar y explicar los fenómenos, o bien que las estrategias empleadas por ellos puedan no ser las más apropiadas para la resolución de un problema (Matthews, 1997).

## 2.4. LAS ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS PARA EL DESARROLLO CURRICULAR, PROPUESTA DE NEUS SANMARTÍ

En el primer capítulo de este trabajo se enunció como objetivo general el diseño y validación de una Estrategia Didáctica con la que se abordará el fenómeno de la simultaneidad, enmarcada en la Teoría de la Relatividad Especial. Por lo anterior se aclarará lo que se entiende por una Estrategia Didáctica (ED) con base a la propuesta de Neus Sanmartí, la cual está enmarcada dentro del constructivismo.

Se debe hacer notar la distinción entre tres tipos de vertientes en el constructivismo: la primera es la que se adopta comúnmente dentro de la educación; otra propuesta es la epistemológica con la que se explica la construcción de conocimiento, y por último la versión sociológica (Matthews, 1997). En el presente trabajo sólo se considerará al constructivismo desde la educación cuyos aspectos centrales son la importancia de considerar a los estudiantes como personas capaces de construir conocimiento; el reconocer que la ciencia es construida por seres humanos; y que en la enseñanza se debe dar prioridad para promover que los estudiantes encuentren sentido a lo que se les enseña; considerar las ideas o conocimientos previos que los alumnos tienen y detectar las dificultades que surjan en el proceso (Linjse, 2000).

Al diseñar una Estrategia Didáctica se toman decisiones con base en objetivos y decisiones de quién imparte las clases (Appleton y Asoko, 1996). Lo anterior se realiza a partir de considerar criterios para: definir la finalidad y los objetivos de la enseñanza, la selección de contenidos y actividades, su organización así como la secuenciación durante la ED, al igual que actividades de evaluación y organización del grupo dentro del aula. A continuación se detallan los criterios antes mencionados a tomar en cuenta para el diseño de la ED.

Una de las consideraciones importantes para el diseño de la ED es que los objetivos generales de la misma deben ser pocos, ya que el tiempo previsto para llevarlos a cabo es limitado. Dichos objetivos se deben establecer con la premisa de tener en cuenta las dificultades de los alumnos y éstos deben hacerse explícitos, con la finalidad de que los estudiantes identifiquen aquello que el

docente prioriza, esto además sirve para que los profesores analicen la coherencia y significatividad, tanto de la ED como del currículo. También pueden existir objetivos particulares en la ED, los cuales se determinan bajo la influencia de las finalidades que se conciben en la enseñanza, como es el caso de lo que se considera importante enseñar y la mejor forma para hacerlo y el modo que se conciba el aprendizaje. Los objetivos particulares también son influenciados por los intereses del docente, los conocimientos previos de los alumnos y los hábitos de los mismos, ya sea de trabajo o estudio (Jorba y Sanmartí, 1993; Sanmartí, 2000, 2003 y 2007).

Por otro lado en la selección de contenidos debe considerar factores como el hecho de que éstos deben posibilitar la comprensión de fenómenos paradigmáticos de la ciencia y la diversidad de niveles entre estudiantes de un grupo, es decir que todos los estudiantes aprendan de un punto no muy lejano a sus conocimientos previos. Los contenidos seleccionados deberán organizarse y secuenciarse para construir la ED, con base en decisiones que posean un sustento didáctico. Lo anterior implica considerar el nivel de abstracción de los contenidos contemplados, su complejidad y que al inicio de la ED tengan cercanía con los conocimientos previos de los estudiantes para posibilitar la construcción de su conocimiento. En este proceso es importante considerar formas para promover la mejora en el proceso que realizan los alumnos para hacer sus construcciones y considerar hipótesis del progreso del mismo (Jorba y Sanmartí, 1993; Sanmartí, 2000, 2003 y 2007).

Aparte de seleccionar y secuenciar los contenidos, también se debe hacer lo mismo con las actividades que se realizarán en el aula dentro de la ED, ya que la elección del conjunto de actividades organizadas y secuenciadas hará posible que exista un tránsito entre las construcciones iniciales hacia otras más completas. Cabe señalar que lo anterior es resultado de las acciones reflexivas de los docentes y de la visión que se tenga acerca de la forma en que los individuos conocen; por ejemplo dentro del constructivismo se considera fundamental promover la autoevaluación y autorregulación por parte de los alumnos, por lo que se recomienda favorecer la expresión de las ideas de éstos, su contrastación en grupo o con ayuda de algún procedimiento experimental, además se debe promover que los estudiantes tomen conciencia de su propio avance (Pirie y Kieren, 1992; Jorba y Sanmartí, 1993; Sanmartí, 2003 y 2007).

Finalmente la organización en el aula dentro de la ED es necesaria para regular las interacciones en el grupo y para distribuir el tiempo en la misma. Mediante la organización del grupo se puede favorecer la comunicación con la intención de que los estudiantes expresen sus ideas, sus modelos y explicaciones, de modo que sea posible la contrastación de las mismas. En este proceso tiene lugar la negociación entre los alumnos y posteriormente se puede llegar a algún acuerdo. En el trabajo en grupo se deben considerar actividades enfocadas al trabajo individual y colectivo. Otro aspecto a atender mediante la organización en el aula es la diversidad de niveles y ritmos de aprendizaje de los alumnos, ya que la pertinente secuenciación de las actividades permitirá que los alumnos aprenden desde sus propios puntos de partida. Lo anterior se puede lograr al combinar actividades individuales y con grupos heterogéneos o introduciendo actividades diferenciadas que posibiliten la aplicación a nuevas situaciones con distinto grado de complejidad (Sanmartí, 2003).

Las actividades de la ED se pueden dividir en cuatro tipos según el avance de la misma; **(1) Actividades de iniciación (AI)** en la cual los estudiantes identifican el problema o fenómeno a estudiar y explicitan sus modelos. Con estas actividades se busca promover el planteamiento de preguntas y la comunicación de los distintos puntos de vista en el aula. **(2)** Luego se encuentran las **Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP)** hacia modelos cada vez más cercanos a los de la ciencia erudita, a partir de la identificación de las inconsistencias de sus propios modelos y explicaciones por medio de la reflexión individual y colectiva, el tipo de actividades en esta etapa deben elegirse de modo que amplíen la visión del alumno respecto al tema, problema o fenómeno de estudio. **(3)** Las **actividades de síntesis (AS)** serán aquellas que promuevan que el alumno explicita lo que aprendió durante la ED y que permitan la formulación de conclusiones para propiciar la abstracción de los aspectos centrales del fenómeno o problema de estudio. **(4)** Por último con las **actividades de aplicación (AA)** se busca que los estudiantes prueben sus concepciones ante nuevas situaciones que permitan iniciar un nuevo proceso de aprendizaje (Sanmartí, 2000).



### 2.4.1. Esquematización de la Estrategia Didáctica

En el cuadro 2.5 se sintetiza de forma esquemática los elementos que se consideraran para el diseño de la Estrategia Didáctica, retomando los elementos de la propuesta de Neus Sanmartí para su diseño.

Cabe señalar que para el diseño de la Estrategia Didáctica se debe tener en cuenta el proceso de modelización expuesto en el cuadro 2.1. Además es necesario hacer explícita la forma en que la modelización se va a embonar en el diseño de la Estrategia Didáctica (ED), por tal razón se esboza de forma general el acoplamiento de la modelización dentro del esquema de la ED en el cuadro 2.5.

Cuadro 2.5: Esquema general de la estrategia didáctica.

Objetivos en la ED.				
Organización de la secuencia	Selección de actividades	Selección de contenidos (con base al currículo)	Evaluación	Modelización
	Actividades de iniciación (AI)	Antecedentes y presentación de un fenómeno paradigmático (CI)	Evaluación inicial (EI)	MCA inicial, Denotación, Demostración
	Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP)	Nuevos elementos para promover el cambio en los modelos de los estudiantes (CP)	Evaluación mientras se está aprendiendo (EP)	MCA intermedio(s), Denotación, Demostración, Interpretación (en proceso)
	Actividades de síntesis (AS)	En este momento de la ED se abarcó todo el contenido (CS)	Evaluación final (ES)	MCEA Denotación, Demostración, Interpretación
	Actividades de aplicación (AA)	Situaciones nuevas, a partir de variaciones al fenómeno para propiciar nuevos ciclos de aprendizaje (CA)	Evaluación final (EA)	Denotación, Demostración, Interpretación

Nota. A modo de recordatorio, MCA denota el Modelo Cognitivo de los Alumnos y se distingue según la etapa, inicial al momento de comenzar la Estrategia Didáctica e intermedio durante el desarrollo de la misma. MCEA corresponde al Modelo Científico Escolar de Arribo, que corresponde al modelo que se espera construyan los alumnos al final de la Estrategia Didáctica. Cuadro de construcción propia.

En el cuadro 2.5 se muestra la forma como se incluirá el proceso de modelización con la Estrategia Didáctica. En la fase inicial se contemplan actividades iniciales (AI), los antecedentes y presentación de un fenómeno paradigmático (CI) y una evaluación inicial (EI). Con las actividades iniciales se buscará en primer lugar exponer y explicitar lo más claro posible a los alumnos los objetivos generales que se buscan lograr con la Estrategia Didáctica (ver sección 1.4.) y también se

propiciará que los estudiantes expliciten sus propósitos para la construcción de modelos.

Dentro de las actividades elegidas en esta etapa, se deberán contemplar algunas que detonen la expresión de los modelos iniciales de los alumnos sobre el fenómeno de la simultaneidad con la finalidad de que puedan ser evaluadas, por ellos mismos y por el docente. En esta primera etapa se le dará mayor énfasis a la denotación y demostración dentro del proceso de modelización, ya que con la denotación se podrá evaluar si los estudiantes identifican las entidades del Modelo Científico Experto, las propiedades de dichas entidades y las relaciones que hay entre ellas y las condiciones necesarias para que el modelo sea válido.

Con esta fase inicial de la Estrategia Didáctica, se debe propiciar que los estudiantes reconozcan, en primer lugar, el fenómeno en cuestión y comiencen a explicitar la relación de similitud entre su modelo con el fenómeno.

Posterior a esta primera etapa se considera la introducción de nuevos elementos (CP) para promover el cambio de los modelos iniciales de los alumnos. Lo anterior se realizará por medio de la realización de actividades para promover la transición de modelos (AP) y permitir el manejo y discusión de los nuevos elementos introducidos (CP).

En este segundo momento se considera evaluar las producciones de los alumnos (EP) para analizar el proceso de modelización que ellos llevan a cabo. Específicamente, se analizará si los estudiantes incorporan los nuevos elementos para reestructurar sus modelos. Se compararán sus construcciones en esta fase con respecto a la del primer momento, en relación a las entidades que consideren en el modelo, sus relaciones, condiciones. Además se evaluarán las reglas de inferencia que incluyan los estudiantes, lo cual corresponde a la demostración dentro del proceso de modelización que se esquematiza en el cuadro (2.1). Es importante remarcar que en esta etapa los estudiantes puedan encontrar inconsistencias entre su modelo y lo que prediga la TRE. En esta etapa se considerará necesario que los alumnos practiquen en mayor medida las interpretaciones en relación al modelo, interrelacionando las entidades, sus propiedades, las relaciones entre ellas, las condiciones de validez del modelo y reglas de inferencia.

Es importante señalar que esta segunda etapa puede repetirse gradualmente según se requiera

el grado de complejidad en la construcción de los modelos de los alumnos, o bien si mediante la evaluación se considera que esta etapa debe repetirse nuevamente para asegurar que el modelo de los estudiantes sea lo más cercano al Modelo Científico Experto (MCE).

A continuación se contempla una tercera etapa, en donde habrá actividades de síntesis (AS), pensadas para que los alumnos terminen de afianzar sus modelos y éstos tengan concordancia con el MCE. En esta etapa de la estrategia didáctica se postula que no se introducirán nuevos elementos teóricos, más bien se deberá aplicar lo visto en una situación nueva (CS). Es importante hacer notar que para este momento, se espera que los estudiantes construyan el modelo del fenómeno en cuestión, y que éste sea lo más cercano al MCE. Para evaluar lo anterior (ES) se utilizará el esquema de la modelización considerado en este trabajo y que se presentó en el cuadro (2.1); además se analizará si la denotación, la demostración y la interpretación están de acuerdo con el MCE que se presentará más adelante. En la evaluación de esta etapa será necesario que los alumnos hagan explícitas las afirmaciones sobre el fenómeno de la simultaneidad, haciendo uso del modelo que construyeron, y puedan explicarlo también en acuerdo con la TRE.

Se debe buscar que el proceso de aprendizaje no se vea como algo que concluye al finalizar un curso o al cubrir un currículo, por tal razón en esta estrategia didáctica se plantea incluir una última etapa donde se hará una evaluación de corroboración (EA) a partir de una situación nueva (AA), que permitirá a los alumnos evaluar sus modelos nuevamente y posibilitar otro proceso donde ellos los adecuen para poder explicar la nueva situación (CA).

### **2.4.2. La evaluación dentro de la Estrategia Didáctica**

En el proceso de enseñanza es fundamental la evaluación y por ello también se deben contemplar actividades para llevar a cabo dicha tarea, por lo que se tendrán que seleccionar actividades para esta finalidad y secuenciarlas dentro de la ED. Es importante recalcar que la evaluación debe tener concordancia con los aspectos teóricos que fundamentan esta propuesta.

A modo de precisión se dirá que la evaluación es un proceso en el que primero se recoge información (por diversos medios) para luego analizarla y emitir un juicio de dicho análisis, a partir

del cual es posible tomar decisiones que se relacionan con dos tipos de finalidades, una de carácter social (para certificar el dominio de ciertos conocimientos); y la otra de carácter pedagógico o reguladora, con la finalidad de identificar los cambios a mejorar en el proceso de enseñanza, de modo que efectivamente se logre la construcción de conocimiento por parte de los alumnos (Sanmartí, 2000).

Sanmartí (2007) menciona que se pueden identificar tres momentos relacionados con la evaluación, en el proceso de enseñanza, que tienen ciertas características y finalidades específicas: la evaluación inicial, la evaluación mientras se está aprendiendo, y la evaluación final.

La evaluación inicial tiene la finalidad de diagnosticar y analizar la situación de cada estudiante antes de iniciar un proceso de enseñanza, para tomar conciencia de los puntos de partida y poder adaptar el proceso a las necesidades detectadas inicialmente.

La evaluación durante el proceso de aprendizaje sirve para detectar los problemas de los estudiantes y ayudarlos a superarlos, de ser posible en un tiempo corto a su detección, la situación ideal sería que un estudiante sea capaz de detectar sus dificultades por sí mismo, comprenderlas y autorregularlas.

Por último, la evaluación final tiene lugar cuando termina el proceso de enseñanza; éste elemento sirve para detectar lo que el alumno no ha acabado de interiorizar y para determinar los aspectos de la secuencia de enseñanza que se pueden modificar para su mejora.

En todo el proceso de evaluación es deseable que exista autorregulación en los alumnos, ya que aquellos alumnos que detectan sus propias dificultades y se regulan a sí mismos para superarlas son los que mejor aprenden; dichos alumnos destacan por su capacidad de percibir y representar de forma adecuada los objetivos de aprendizaje, planificar las operaciones necesarias para realizar las actividades de aprendizaje, y tener claros los criterios de evaluación (Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Sanmartí, 2007; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012). Por esta razón es necesario dedicar tiempo para que los estudiantes revisen su propia planificación para la resolución de una tarea.

## 2.5. ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA EL DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA

A continuación se dará una descripción general del camino trazado para la realización del presente trabajo. Lo anterior tiene la intención de mantener la claridad necesaria para presentar las ideas y procedimientos que sustentan la propuesta de la Estrategia Didáctica.

En primer lugar se delimitó el campo de estudio al que pertenece esta aportación, posteriormente se realizó el planteamiento del problema, la pregunta de investigación y se enunció el objetivo de este trabajo; lo anterior es de suma importancia, ya que permite tener un punto en el horizonte que nos guíe, y posibilite mantener una coherencia durante el proceso y al finalizar el estudio.

Posteriormente se hizo una revisión bibliográfica para fundamentar los referentes teóricos que nos sirven de cimiento en este trabajo, donde se asume la visión semanticista de la ciencia fundamentada en el uso de modelos. Bajo este enfoque se consideró el uso de la argumentación y la metacognición, como prácticas necesarias para la construcción del conocimiento científico, ambos aspectos se consideran centrales dentro de esta aportación para la construcción y manejo de modelos científicos, con los que se busca explicar fenómenos de la naturaleza. De igual modo se realizó una revisión bibliográfica para tener un referente metodológico que posibilite elaborar el diseño de Estrategias Didácticas.

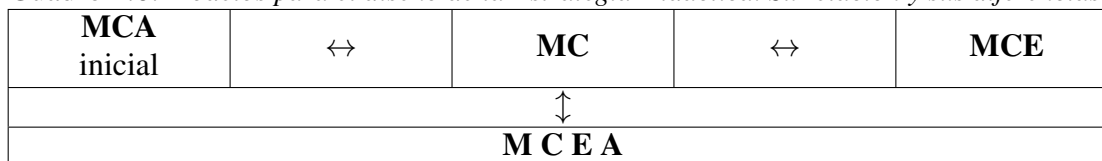
Después de esta pequeña recapitulación se presentará la forma en la que se articulan, en esta aportación, la propuesta acerca de lo que es un modelo (ver sección 2.1.1); lo que se asumirá en este trabajo por modelización y los aspectos a considerar para su práctica en el aula (ver sección 2.2) y por último la conceptualización de lo que es una Estrategia Didáctica (ver sección 2.4), ya que el objetivo planteado, en la sección 1.4, es el diseño de una Estrategia Didáctica centrada en la modelización, que permita transformar los modelos de los estudiantes para que transiten de sus modelos iniciales a otros que sean lo más cercanos a los de la ciencia erudita.

### 2.5.1. Metodología para desarrollar la Estrategia Didáctica bajo la visión de modelos

El presente trabajo se basa en una propuesta para el desarrollo curricular, que consiste en la construcción de una herramienta teórica-metodológica para guiar el diseño de Estrategias Didácticas. Ésta radica en lo que López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) han denominado el *Modelo Científico Escolar de Arribo* (MCEA), cuya construcción implica en primer lugar, la selección de un fenómeno explicado por la ciencia. En el caso de este trabajo corresponde al de la simultaneidad, enmarcado en la teoría de la relatividad especial.

En la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) se propone una ruta metodológica que consiste en realizar una búsqueda inicial sobre ideas previas de los alumnos, respecto a un fenómeno elegido. Dicha búsqueda se puede hacer en revistas especializadas y a partir de los hallazgos se infiere una hipótesis del *Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial* (MCA inicial), previo al diseño de la Estrategia Didáctica. Por otro lado, a partir del currículo escolar es posible inferir otro modelo, que corresponde a una hipótesis de lo que un alumno, en principio, sería capaz de construir después de cubrir el temario de estudio, a dicho modelo se le denomina como *Modelo Curricular* (MC). Este segundo tipo de modelo se construye tomando como referente al *Modelo Científico Experto* (MCE), ya que el currículo se basa en el conocimiento de la ciencia erudita; pero cabe señalar que el Modelo Curricular (MC) en principio es más limitado, dado que los currículos acotan el material a enseñar en el aula. Es a partir de las tres construcciones (MCA inicial, MC y MCE) que se puede postular el modelo que los alumnos alcanzarán después de implementar la Estrategia Didáctica, al cual se le denomina como *Modelo Científico Escolar de Arribo* (MCEA). Para proponer el MCEA se debe comparar el punto de partida de los estudiantes propuesto en el MCA inicial con el MC y éste último con el MCE. Cabe señalar que en este trabajo se considerarán las construcciones de los alumnos durante el inicio y desarrollo de la estrategia didáctica, por tal motivo se diferencian estas como MCA inicial y MCA intermedios, durante la ED.

Cuadro 2.6: Modelos para el diseño de la Estrategia Didáctica. Su relación y sus diferencias.



Cuadro de construcción propia.

Es necesario hacer una serie de consideraciones antes de comenzar a postular los modelos mencionados anteriormente para la Estrategia Didáctica (MC, MCE y MCEA). En primer lugar se debe reconocer que el MCA inicial, dependerá de factores como el conocimiento que tengan los estudiantes acerca del fenómeno, ya que pudiera suceder que hayan visto algo acerca de él en un curso previo o por tener acceso a información de revistas, libros, vídeos, etc. Es por esta razón que es importante hacer la búsqueda de ideas previas de los estudiantes sobre el fenómeno, tanto en revistas especializadas, como en el aula.

La segunda consideración a tomar en cuenta es que se trabajará en un contexto particular, acotado en primer lugar por la institución educativa donde se desarrollará la Estrategia Didáctica, que en el presente caso es la Facultad de Ciencias de la UNAM. Dicha institución tiene diseñado un plan de estudios que se concreta en el currículo de cada una de sus asignaturas. En esta contribución se decidió trabajar con una sola unidad del currículo de la materia “Electromagnetismo I”, en la cual se aborda la Teoría de la Relatividad Especial, con lo que se fija un punto de partida para acotar los contenidos a desarrollar. Como la selección de contenidos no depende del profesor, puede suceder que al construir el MC, a partir del currículo se tenga un modelo muy avanzado y posiblemente muy cercano al de la ciencia erudita ( $MC \simeq MCE$ ). En caso de que así sucediera, se debe analizar si el objetivo del curso es que los alumnos sean capaces de construir el MCE al finalizar el curso o la unidad; para ello se debe tener precaución de tomar en cuenta el nivel de estudios en el que se encuentran los estudiantes, así como el Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial). De no hacerlo así, existe un riesgo, que la distancia entre el MCA inicial y el  $MC \simeq MCE$  (muy cercano al MCE) sea muy grande y entonces la dificultad para lograr la construcción del MC al finalizar la Estrategia Didáctica, sea alta. Como consecuencia, es posible anticipar que será poco probable alcanzar dicha

meta. Por tanto es necesario evaluar si la propuesta del currículo es pertinente y en caso contrario adecuarlo para tener una opción más tangible.

Después de tomar en cuenta lo anterior, es posible ver la necesidad de adecuar el currículo para adaptarse a las condiciones que se puedan presentar, por ejemplo que los estudiantes tengan ideas similares a las que se reportan en la sección "Investigaciones en Educación en Ciencias, relativas a ideas previas y Estrategias Didácticas sobre aspectos de la Teoría Especial de la Relatividad Especial" (sección 1.2.1). Por lo tanto, al final se contará con los tres modelos: MCA inicial de los alumnos, MC (a partir del currículo adecuado) y MCE. Con ellos se deberá postular el modelo que alcanzarán los estudiantes al finalizar la Estrategia Didáctica, es decir el MCEA.

En el siguiente esquema se muestra un caso hipotético, en el que hay una separación muy grande entre el MCA inicial y el MC, por lo cual sería de esperarse que el MCEA alcanzado diste mucho del MC. Este posible escenario es el que se busca sortear con el diseño de la Estrategia Didáctica.

Cuadro 2.7: *Ubicación del MCEA según el MCA inicial y el MC.*

<b>MCA inicial</b>	..	→	..	<b>MCEA</b>	....	→	....	<b>MC</b>
--------------------	----	---	----	-------------	------	---	------	-----------

Cuadro de construcción propia.

Al diseñar una ED con sustento didáctico y planificación, tanto del contenido como de las actividades, se propone guiar a los estudiantes en el tránsito de sus modelos iniciales (MCA iniciales) a modelos intermedios (MCA intermedios), que sean cada vez más completos y con los que puedan dar explicaciones más cercanas a las de la ciencia erudita; la situación ideal sería que al finalizar la ED sus modelos construidos fueran similares al MC ( $MCEA \approx MC$ ).

Cuadro 2.8: *Uso de Estrategias Didácticas para lograr que el MCEA sea muy similar al MC.*

<b>MCA inicial</b>	...	→	...	<b>MCA intermedios</b>	...	→	...	<b>MCEA ≈ MC</b>
--------------------	-----	---	-----	------------------------	-----	---	-----	------------------

Cuadro de construcción propia.

Dentro de los criterios para el diseño de la Estrategia Didáctica podemos mencionar que el contenido propuesto por el currículo no debe estar demasiado alejado de las ideas de los estudiantes, por esa razón se deben tomar decisiones al adecuarlo, tomando en consideración el tiempo que se



tenga para abordar el contenido, los antecedentes de los estudiantes, así como la dificultad de los temas a abordar.

Al finalizar la implementación de la Estrategia Didáctica y evaluarla podrán suceder dos situaciones: que los alumnos efectivamente logren construir un modelo muy similar al MCEA, ante lo cual se diría que la Estrategia Didáctica es exitosa; de otro modo se deben considerar las adecuaciones pertinentes para que los alumnos construyan sus modelos lo más cercano posible al MCEA.

## Capítulo 3

# CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS: CIENTÍFICO EXPERTO, CURRICULAR, Y COGNITIVO DE LOS ALUMNOS

En el presente capítulo se postularán los diferentes modelos que se consideran en la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013): Modelo Científico Experto, Modelo Curricular y Modelo Cognitivo de los Alumnos. A partir de dichas postulaciones se propondrá el Modelo Científico Escolar de Arribo que podrían construir los alumnos al finalizar la Estrategia Didáctica.

Para poder diseñar la Estrategia Didáctica, planteada como objetivo fundamental del presente trabajo, es necesario elegir un fenómeno paradigmático que sea explicado con la Teoría de la Relatividad Especial, para poder fijar objetivos particulares con los alumnos (Jorba y Sanmartí, 1993; Sanmartí, 2000, 2003 y 2007). Por tal razón a continuación se presentará el fenómeno de la simultaneidad. Dicha elección se hizo por que existe una amplia discrepancia entre la explicación que se puede dar acerca de él, utilizando física clásica y la explicación mediante la TRE. En el primer caso los eventos que sean simultáneos para un observador, lo serán para el resto de posibles observadores; mientras que con la Teoría de la Relatividad Especial se predice algo distinto, que se analizará y explicará a continuación.

### 3.1. FENÓMENO DE PARTIDA PARA LA SECUENCIA DIDÁCTICA, LA SIMULTANEIDAD DESDE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

El diseño de la secuencia didáctica que se construye para el presente trabajo, tiene como uno de sus componentes más importantes la elección de un fenómeno de partida o inicial, con la finalidad de establecer objetivos comunes en el aula para los estudiantes. El fenómeno en cuestión corresponde al de simultaneidad, enmarcado en la Teoría de la Relatividad Especial.

En la física clásica la simultaneidad de un par de eventos tiene un carácter absoluto, no depende de la elección de los sistemas de referencia, debido a que el tiempo es el mismo para todo observador en el universo. Por el contrario en la Teoría de la Relatividad Especial, al postular que la velocidad de la luz en el vacío es invariante y finita, es decir que su velocidad será la misma en todos los sistemas de referencia, desprovee al tiempo de su carácter absoluto, y obliga a revisar la noción de la simultaneidad.

A continuación se enuncia de forma general el fenómeno de la simultaneidad basada en el texto de Ferraro (2007) y más adelante se concretará una situación en la cual este presente dicho fenómeno.

En un sistema de referencia  $S^1$  se detectan dos eventos,  $Q_1$  en la posición  $p_1$  y  $Q_2$  en la posición  $p_2$ . Ambos eventos serán simultáneos si cuando suceden, coinciden con el arribo de señales luminosas previamente emitidas desde alguna posición ubicada a distancias iguales, de ambos eventos. Si en algún otro sistema de referencia  $S$  no se registra lo anterior, para los eventos  $Q_1$  y  $Q_2$ , entonces en dicho sistema de referencia ambos eventos no serán simultáneos.

Para poder explicar y entender dicho fenómeno es necesario hacer una revisión de varios aspectos, desde la mecánica clásica y posteriormente se hará un análisis a partir de la Teoría de la Relatividad Especial. La revisión que se presenta a continuación se hará con base en el libro de Rahaman (2014).

### 3.1.1. Contexto inicial: mecánica newtoniana

Isaac Newton fue quien propuso las leyes de movimiento de la mecánica. La primera de ellas establece que todo cuerpo mantiene su estado de movimiento, ya sea que esté en reposo o con movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea afectado por una fuerza externa que cambie dicha condición. Lo anterior podrá ser visto de distintas formas según el estado de movimiento de quién observe. Por ejemplo una persona en un sistema de referencia en reposo verá que no cambia la posición de un objeto en reposo a menos que se le aplique una fuerza externa; sin embargo, alguien más situado en un sistema de referencia con movimiento rectilíneo uniforme, observará que el objeto en cuestión se mueve. En ambos sistemas es válida la primera ley de Newton; sin embargo habrá sistemas de referencia donde no lo sea, tal es el caso de un sistema de referencia acelerado, ya que un observador en él, percibirá al objeto como si estuviera acelerado sin que hubiera una fuerza patente que cambiara el estado de movimiento del cuerpo. Por lo tanto, para hablar del estado de movimiento de un cuerpo se debe especificar el marco de referencia relativo al cual la posición del cuerpo es determinada

Las leyes de Newton sirven para describir el movimiento de cuerpos macroscópicos, los cuales tienen velocidades ( $v$ ) mucho menores que la velocidad de la luz,  $c = 3 \times 10^8 m/s$ , en cambio en el mundo microscópico se puede encontrar partículas moviéndose con velocidades cercanas a  $c$ . Se ha encontrado experimentalmente que éstas partículas no se ajustan a las predicciones de la mecánica newtoniana, razón por la cual es necesario estudiar nuevas teorías de la física para explicar fenómenos de esta naturaleza. Una de ellas es la Teoría de la Relatividad Especial, en la cual se considera que la velocidad con que se mueven las cosas tiene un límite -la velocidad de la luz  $c$ - y no se concibe que ésta pueda ser infinita.

#### 3.1.1.1. Transformaciones galileanas

Es posible establecer la relación entre los movimientos de un objeto, registrados por dos observadores en sistemas de referencia inerciales distintos, mediante unas transformaciones que evidencien el hecho de que las leyes de Newton se cumplen en todos los sistemas de referencia inerciales. Para

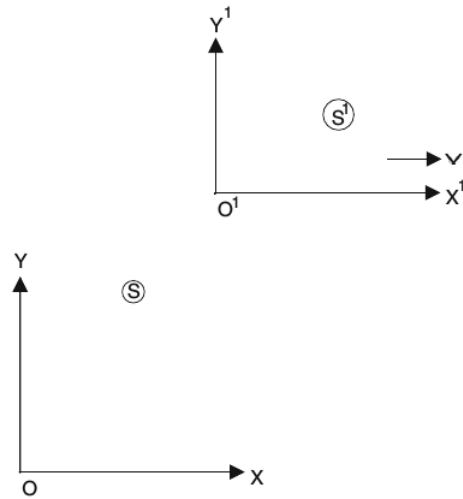


Figura 3.1: Marco de referencia  $S^1$  moviéndose con velocidad  $v$  en la dirección del eje  $x$ .

lo anterior es útil considerar dos sistemas de referencia inerciales y cartesianos,  $S$  y  $S^1$  cuyos ejes coordenados son  $(x, y, z)$  y  $(x^1, y^1, z^1)$ , los cuales son paralelos entre sí. Se asume que al tiempo  $t = 0$ , el origen  $O^1$  del sistema  $S^1$  coincide con el origen  $O$  del sistema  $S$ . El sistema  $S^1$  se supone en movimiento uniforme con una velocidad  $v$  a lo largo del eje  $x$ .

Después de definir los sistemas de referencia, supongamos que un evento ocurre en el punto  $P$  cuyas coordenadas son  $(x, y, z)$  en  $S$  y  $(x^1, y^1, z^1)$  en  $S^1$  respectivamente, y sea  $t$  y  $t^1$  el tiempo al que ocurre un evento  $P$  según registran en sus relojes los observadores en  $S$  y  $S^1$ .

La forma de relacionar las coordenadas entre ambos sistemas de referencia se hace por medio de las transformaciones de Galileo, las cuales se muestran a continuación

$$x_1 = x - vt \tag{3.1}$$

$$y^1 = y \tag{3.2}$$

$$z^1 = z \tag{3.3}$$

Se supone que el tiempo es independiente de cualquier sistema de referencia, por lo tanto el tiempo registrado en ambos sistemas será el mismo, lo cual se expresa en la siguiente regla de transformación

$$t^1 = t \tag{3.4}$$

Con ayuda de la ecuación (3.4) podemos decir que el intervalo de tiempo que transcurre entre dos eventos,  $A$  y  $B$ , es igual para cada observador

$$t_A^1 - t_B^1 = t_A - t_B$$

Las transformaciones de Galileo, ecuaciones (3.1) a (3.4), son válidas solo para posiciones relativas entre los sistemas de referencia  $S$  y  $S^1$ . Estas son las transformaciones de las coordenadas del evento en  $S$  al sistema de referencia  $S^1$ . Debe mencionarse que se considerará al tiempo como una cuarta coordenada para describir un evento, que estará definido por  $(x, y, z, t)$ .

Si ahora se derivan las ecuaciones (3.1) a (3.3) con respecto al tiempo, se obtiene lo siguiente

$$u_x^1 = u_x - v \tag{3.5}$$

$$u_y^1 = u_y \tag{3.6}$$

$$u_z^1 = u_z \tag{3.7}$$

derivando una segunda vez, se obtiene que la aceleración de un cuerpo visto desde ambos sistemas de referencia es la misma

$$a_x^1 = a_x \tag{3.8}$$

$$a_y^1 = a_y \tag{3.9}$$

$$a_z^1 = a_z \tag{3.10}$$

como las componentes de la aceleración son las mismas en los dos sistemas de referencia, las leyes de Newton son válidas en ambos sistemas  $S$  y  $S^1$ . Así queda clara la siguiente definición de un sistema de referencia inercial y no inercial.

**Sistema de referencia inercial:** Los sistemas relativos para los cuales un cuerpo sobre el cual no actúan fuerzas, se observará sin aceleración.

**Sistemas de referencia no inerciales:** Los sistemas relativos para los cuales un cuerpo sin

fuerzas aplicadas, parece estar acelerado.

Nótese que no solamente  $S$  y  $S^1$  son sistemas inerciales, sino que todos aquellos que tengan movimiento uniforme relativo a ellos son inerciales. En otras palabras, existe una infinidad de sistema de referencia de éste tipo.

### 3.1.1.2. Principio de relatividad

El principio de relatividad establece que todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes, debido a eso es imposible que un observador determine el estado de movimiento (absoluto) del sistema de referencia en el que esté situado por medio de experimentos. Lo anterior se debe a que las leyes de la física en un sistema de referencia inercial son las mismas para cualquier otro sistema del mismo tipo. Para que sea posible la equivalencia entre sistemas de referencia inerciales se necesita que las leyes de la física se mantengan ante transformaciones de coordenadas.

En la física newtoniana los fenómenos como el movimiento de los cuerpos se explican mediante dos leyes complementarias, en primer lugar está la segunda ley de Newton con la cual es posible determinar la aceleración que un objeto de masa  $m$  adquiere al estar bajo el efecto de una fuerza  $F$ .

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3.11)$$

Por otro lado están las leyes que describen las interacciones entre los cuerpos, es decir que especifican el valor de la fuerza  $F$  en la segunda ley de Newton (ecuación 3.11). Ejemplos de este tipo de fuerzas son la ley universal de la atracción gravitacional.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.12)$$

donde  $G = 6.674 \times 10^{-11} Nm^2/kg$  es la constante de gravitación universal,  $m_1$  y  $m_2$  las masas de dos cuerpos y  $r$  la distancia que los separa.

Entonces si la segunda ley de Newton (ec. 3.11) es invariante también la fuerza lo debe ser; por ejemplo la ley de la gravitación universal (ec. 3.12) depende de la distancia entre los cuerpos,

entonces si en un sistema de referencia inercial se tienen dos cuerpos fijos y se mide la fuerza de atracción entre ellos, en cualquier otro sistema de referencia inercial, la fuerza será la misma, dado que la distancia es invariante ante las transformaciones de Galileo y por lo tanto se satisface el principio de relatividad.

### **3.1.1.3. *Sistemas de referencia privilegiados***

En la sección anterior se abordó el principio de la relatividad que establece la equivalencia entre sistemas de referencia inerciales, mediante la cual se elimina la posibilidad de determinar un sistema privilegiado sobre los otros. Ahora bien, dentro de la mecánica clásica hay fenómenos para los cuales es necesario considerar sistemas de referencia absolutos. Por ejemplo en el caso de un cuerpo que se mueve inmerso en un fluido viscoso, éste experimentará una fuerza de fricción que incrementará exponencialmente con la velocidad; en dicho ejemplo la velocidad relativa del cuerpo no lo es respecto a otro sistema de referencia sino al fluido. En el caso de que el cuerpo esté en reposo la fuerza será nula y por tal razón el fluido será el sistema de referencia privilegiado para analizar dicho fenómeno.

Otro fenómeno más donde se puede considerar la existencia de un sistema de referencia privilegiado, es la propagación de ondas mecánicas por un medio, por ejemplo el sonido al propagarse por el aire, agua o un sólido. Las ondas mecánicas son en si perturbaciones que se propagan por un material, por lo que el sistema de referencia anclado al medio es un sistema privilegiado. Lo anterior cobra sentido cuando se analiza la ecuación de onda, la cual sólo es válida en dicho sistema de referencia, ya que en particular la velocidad de propagación de la onda, que aparece en la ecuación de onda, está determinada por las propiedades del medio de propagación. En el último caso, la existencia de un sistema de referencia privilegiado no viola el principio de la relatividad debido a que la ecuación de onda puede ser utilizada en cualquier sistema de referencia inercial, donde el medio material esté en reposo. Además la ecuación de onda es el resultado de realizar aproximaciones que son válidas en el sistema de referencia fijo al medio y es a partir de las leyes de la mecánica que se posibilita satisfacer el principio de la relatividad.



#### 3.1.1.4. *Ondas electromagnéticas y el éter*

Las leyes que gobiernan los fenómenos electromagnéticos fueron concebidas por James Clerk Maxwell después del descubrimiento de la inducción electromagnética por Michael Faraday en 1831. A partir de las leyes de Maxwell se puede deducir una ecuación que describe a ondas de campos electromagnéticos. Maxwell encontró que la velocidad de dichas ondas coincidía con el valor medido de la velocidad, por lo que concluyó que la luz es una onda electromagnética.

Debido a la existencia de fenómenos ondulatorios electromagnéticos y de fenómenos donde existen fuerzas dependientes de la velocidad, como es el caso de las partículas cargadas moviéndose a través de un campo magnético, se pensó en un inicio que las ondas electromagnéticas tenían lugar dentro de un medio material, de modo que las leyes de Maxwell serían válidas únicamente en los sistemas inerciales fijos con dicho medio, al cual se le denominó como el éter.

Con los avances técnicos a inicios del siglo XX, los científicos trataron de medir la velocidad de la luz con mayor precisión y entonces de manera natural surgió la interrogante sobre el sistema de referencia en el que era medida la velocidad de la luz. Además como ya se mencionó se creía que las ondas electromagnéticas requerían un medio para propagarse como sucede por ejemplo con el sonido. Entonces se supuso que en todo el espacio existía un medio por donde se propagaba la luz, llamado Éter. De este modo se propuso que los sistemas de referencia privilegiados eran aquellos que permanecían en reposo relativo a este medio. Se creía que el éter era perfectamente transparente a la luz y no ejercía resistencia sobre los materiales ni los cuerpos que se movían por él.

La velocidad rotacional de la Tierra es de aproximadamente  $3 \times 10^4 m/s$ , entonces de acuerdo con las transformaciones galileanas, la medición de la velocidad de la luz debería depender de su dirección de propagación con respecto al movimiento de la Tierra a través del éter, ya que al suponerse al éter fijo en el espacio, se consideraba plausible encontrar la velocidad absoluta de los cuerpos en movimiento respecto a él. Varios físicos como Fizeau, Michelson y Morley, Troton y Noble, junto con muchos otros realizaron diversos experimentos para encontrar la velocidad absoluta de la Tierra respecto del éter; pero sus intentos fallaron y la propuesta sobre su existencia tuvo que ser rechazada.

### 3.1.1.5. Ondas electromagnéticas bajo las transformaciones de Galileo

Las únicas leyes conocidas entre los siglos XVII y XVIII, para explicar la dinámica de los cuerpos fueron las leyes de la mecánica, las cuales son invariantes ante las transformaciones de Galileo para sistemas inerciales, es decir que en cualquier sistema de referencia inercial dichas leyes serán las mismas. Posteriormente las leyes de la electrodinámica fueron concebidas por James Clerk Maxwell para explicar otro tipo de fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo. Se encontró que dichas leyes no son invariantes bajo las transformaciones de Galileo por lo que surgió una inconsistencia entre la mecánica clásica y la teoría electromagnética.

La Electrodinámica está gobernada por las ecuaciones de Maxwell, bajo las cuales es posible identificar a la luz como una onda electromagnética ( $\psi$ ), que se propaga en el vacío con velocidad  $c = 3 \times 10^8 m/s$ . En un marco de referencia  $S$  la onda electromagnética estará descrita por

$$\psi = f \left[ \vec{k} \cdot \vec{r} - ct \right]$$

donde  $\vec{k} = l\hat{i} + m\hat{j} + n\hat{k}$  es un vector unitario que indica la dirección de propagación de la onda y  $\vec{r}$  es el vector de posición que indica los lugares del espacio por donde pasa la misma. Ahora si se considera otro sistema de referencia  $S^1$  en movimiento con velocidad  $\vec{v}$  relativa a  $S$ , desde el cual un observador determina la representación de dicha onda electromagnética por medio de las transformaciones de Galileo, ver las ecuaciones (3.1) y (3.4), se encontrará lo siguiente

$$\psi^1 = f \left( \vec{k} \cdot (\vec{r}^1 + \vec{v}t) - ct \right) = f \left[ \vec{k} \cdot \vec{r}^1 - (c - \vec{k} \cdot \vec{v})t \right]$$

de la ecuación anterior se observa que en el sistema de referencia  $S^1$ , la velocidad de la onda será  $(c - \vec{k} \cdot \vec{v})$ ; la cual será diferente según su dirección de propagación. Por ejemplo, si  $\vec{k}$  y  $\vec{v}$  son paralelos, el producto punto  $\vec{k} \cdot \vec{v}$  es una cantidad positiva, entonces  $c - \vec{k} \cdot \vec{v} < c$ , es decir, la onda electromagnética tendrá una velocidad menor para un observador situado en el sistema de referencia que se mueve con velocidad  $\vec{v}$  en la misma dirección por la que se propaga la onda. Por el contrario,

si la onda electromagnética se moviera en el sentido contrario al movimiento del marco de referencia  $S_1$ , los vectores  $\vec{k}$  y  $\vec{v}$  serían antiparalelos y el producto punto  $\vec{k} \cdot \vec{v}$  resultaría una cantidad negativa, por lo que  $c - \vec{k} \cdot \vec{v} > c$ , es decir, que un observador situado en un marco de referencia que se mueve en sentido contrario a la onda electromagnética vería que ésta se propaga con una velocidad mayor que  $c$ .

Con lo anterior se encontró una inconsistencia que planteaba dos opciones, la primera era que la teoría electromagnética debía ser reformulada, o bien hacer lo propio con la mecánica clásica. Ante estas opciones se buscaron soluciones alternativas y una de ellas consistió en proponer otro tipo de transformación de coordenadas, distintas a las de Galileo, que se conocen como transformaciones de Lorentz.

### 3.1.2. Teoría de la Relatividad Especial

#### 3.1.2.1. *Concepto relativista del espacio y el tiempo*

Einstein replanteó la idea del espacio y el tiempo basado en el hecho de que los observadores que se encuentran en movimiento relativo entre ellos miden la misma velocidad de la luz. Esta nueva idea del espacio y el tiempo no es solamente válida para la mecánica sino también para todos los fenómenos ópticos y electromagnéticos, que se describen mediante la Teoría de la Relatividad Especial.

En la Teoría de la Relatividad, se pueden distinguir dos casos muy particulares, el primero parte de considerar los fenómenos relativistas, sin tomar en cuenta la existencia de gravedad, este caso corresponde a la Teoría de la Relatividad Especial (TRE) y es una idealización simplificada de la realidad que se limita a explicar situaciones o fenómenos desde sistemas de referencia inerciales. Por otro lado tenemos el caso en donde se considera la presencia de campos gravitacionales y por lo tanto se considera la posibilidad de tener sistemas no inerciales, i.e. los sistemas que se mueven con aceleración relativa entre ellos. En el presente trabajo, se elige un fenómeno enmarcado dentro de la TRE y se dejará de fuera el abordar la TRG, salvo para dejar abierto el proceso de aprendizaje de

los alumnos y de este modo perciban que con la TRE no se tiene un conocimiento acabado, de este modo se espera que surja en ellos la curiosidad por saber más y sigan aprendiendo.

### 3.1.2.2. *Postulados de la teoría de la relatividad*

Para desarrollar la Teoría de la Relatividad Especial, Einstein utilizó dos postulados fundamentales:

[1] El principio de relatividad o equivalencia: Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inercial. No existen sistemas de referencia inerciales privilegiados.

[2] El principio de la invarianza de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz en el vacío es una constante, independientemente de la dirección de propagación y de la velocidad relativa entre la fuente de luz y el observador.

Se puede notar que el primer principio no cambia respecto a la forma newtoniana, pero conforme se aplican ambos postulados puede encontrarse que para comunicar las mediciones entre sistemas de referencia inerciales, ya no es posible utilizar las transformaciones de Galileo y en lugar de ellas se utilizan las transformaciones de Lorentz que cumplen con ambos principios. Por otro lado el segundo principio no es consistente con las transformaciones galileanas e indica una clara división entre la teoría newtoniana y la Teoría de la Relatividad Especial.

### 3.1.2.3. *Transformaciones de Lorentz basadas en los postulados de la Teoría de la Relatividad Especial*

Supongamos que un evento ocurre en el punto  $P$  en un sistema de referencia  $S$  especificado por las coordenadas  $x, y, z$  y  $t$ . En otro sistema de referencia inercial  $S^1$ , el cual se mueve con una velocidad constante  $v$  a lo largo del eje  $x$ , el mismo evento será especificado por las coordenadas  $x^1, y^1, z^1$  y  $t^1$ . Se supone a los observadores en los dos sistemas de referencia situados en el origen  $O$  y  $O^1$  de los sistemas  $S$  y  $S^1$  respectivamente. La transformación galileana entre  $x$  y  $x^1$  es  $x^1 = x - vt$ .

Con el conocimiento de que las transformaciones de Galileo fallan, entonces una suposición razonable sobre la naturaleza de la relación correcta será la siguiente

$$x^1 = k(x - vt) \quad (3.13)$$

donde  $k$  es un factor que no depende de  $x$  o de  $t$ , pero puede ser una función de  $v$ .

Utilizando el primer postulado de la TRE, que establece que las leyes de la física son las mismas para todos los sistemas de referencia inerciales, podemos suponer que la ecuación (3.13) debe tener la misma forma para ambos sistemas de referencia  $S$  y  $S^1$ . Ahora si consideramos la relación inversa para determinar a  $x$  en términos de  $x^1$  y  $t^1$ , se tiene lo siguiente

$$x = k(x^1 + vt^1) \quad (3.14)$$

Por otro lado la coordenada  $y$  es igual a  $y^1$  y también  $z$  es igual a  $z_1$ , ambas perpendiculares a  $v$

$$y^1 = y \quad (3.15)$$

$$z^1 = z \quad (3.16)$$

Además se supone que  $t^1$  no puede ser igual que  $t$ . Sustituyendo el valor de  $x^1$  en (3.14) obtenemos lo siguiente

$$x = k [k(x - vt) + vt^1] = k^2(x - vt) + kv t^1$$

o despejando a  $t^1$

$$t^1 = kt + \left( \frac{1 - k^2}{kv} \right) x \quad (3.17)$$

El segundo postulado de la relatividad nos da una forma de evaluar  $k$ . En el instante  $t = 0$ , los dos orígenes de los dos sistemas de referencia  $S$  y  $S^1$  están en el mismo sitio. Supongamos que una señal de luz es emitida por una fuente en el origen común de  $S$  y  $S^1$  en el tiempo  $t = t^1 = 0$ . Los

observadores en cada sistema miden su velocidad de propagación. Debido al segundo postulado, ambos observadores deben encontrar la misma velocidad  $c$ , lo que significa que en el marco de referencia  $S$  se tenga lo siguiente,

$$x = ct \tag{3.18}$$

y en el sistema de referencia  $S_1$

$$x^1 = ct^1 \tag{3.19}$$

ahora, sustituyendo la ecuación (3.13) y la ecuación (3.17) en la ecuación (3.19) se obtiene lo siguiente

$$k(x - vt) = c \left[ kt + \left( \frac{1 - k^2}{kv} \right) x \right]$$

despejando  $x$

$$x = \frac{ct \left( 1 + \frac{v}{c} \right)}{\left[ 1 - \left( \frac{1 - k^2}{k^2} \right) \frac{c}{v} \right]}$$

como  $x = ct$

$$ct = \frac{ct \left( 1 + \frac{v}{c} \right)}{1 - \left( \frac{1}{k^2} - 1 \right) \frac{c}{v}}$$

entonces se encuentra el valor de  $k$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{3.20}$$

utilizando la expresión de  $k$  dada en la ecuación (3.20) para sustituirlo en las ecuaciones (3.13) y (3.17), obtenemos los valores de  $x_1$  y  $t_1$

$$x^1 = k(x - vt) = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.21)$$

$$t^1 = kt + \left( \frac{1 - k^2}{kv} \right) x = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.22)$$

Entonces las ecuaciones (3.15), (3.16), (3.21) y (3.22) dan las transformaciones de Lorentz buscadas.

#### 3.1.2.4. Fenómeno de la simultaneidad y las transformaciones de Lorentz

Con la finalidad de tener una comprensión clara del fenómeno de la simultaneidad, a continuación se presentará una descripción de él, utilizando las transformaciones de Lorentz. Para ello se consideraran dos eventos los cuales se supondrán simultáneos en un sistema de referencia  $S$  en reposo; pero que no lo son en un sistema  $S_1$  en movimiento relativo con respecto al sistema  $S$ .

De forma general supondremos inicialmente que en el sistema de referencia  $S$  los dos eventos suceden al tiempo  $t_1$  y  $t_2$ . Se supone también que un observador en el sistema de referencia en movimiento  $S^1$  observa ambos eventos en dos posiciones diferentes  $x_1$  y  $x_2$ . Por otra parte, el observador en el sistema de referencia en movimiento  $S^1$  registra los correspondientes eventos al tiempo  $t_1^1$  y  $t_2^1$ , respectivamente. Utilizando las transformaciones de Lorentz para la posición, ecuación (3.21), y el tiempo, ecuación (3.22), se obtiene lo siguiente

$$t_1^1 = a \left[ t_1 - \left( \frac{vx_1}{c^2} \right) \right]; \quad t_2^1 = a \left[ t_2 - \left( \frac{vx_2}{c^2} \right) \right] \quad (3.23)$$

entonces,

$$t_2^1 - t_1^1 = a(t_2 - t_1) + a \left( \frac{v}{c^2} \right) (x_1 - x_2) \quad (3.24)$$

con  $a = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

Se puede observar que si los dos eventos son simultáneos en el sistema de referencia en movi-

miento  $S^1$ , entonces  $t_2^1 = t_1^1$  y la ecuación anterior se simplifica del siguiente modo

$$t_2 - t_1 = \left(\frac{v}{c^2}\right)(x_2 - x_1)$$

ya que  $x_1 \neq x_2$ . Entonces, si los eventos son simultáneos en el sistema de referencia  $S^1$ , en general, los mismos eventos no serán simultáneos en el sistema de referencia  $S$ . Con esto queda evidenciado que la simultaneidad no es absoluta, sino relativa.

## 3.2. ELECCIÓN DE UNA SITUACIÓN PARTICULAR DONDE ESTÁ PRESENTE EL FENÓMENO DE LA SIMULTANEIDAD

Con el contexto anterior se pueden obtener criterios para elegir una situación donde se haga patente el fenómeno de la simultaneidad desde el enfoque de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE). Dicha situación debe hacer notar el conflicto entre la explicación que se puede construir con la mecánica clásica y la explicación a partir de la TRE.

### 3.2.1. Descripción del arreglo experimental, en el que ocurre el fenómeno de la simultaneidad

Como ya se mencionó, el segundo postulado es fundamental para la elección del fenómeno que se propone en la siguiente situación:

Se tienen dos sistemas de referencia inerciales  $S$  y  $S^1$  (figura 3.1), en los cuales estarán situados dos observadores  $o$  y  $o_1$  respectivamente. El sistema de referencia  $S^1$  se moverá con velocidad constante  $v$  en dirección de su eje  $x$ , mientras que el sistema de referencia  $S$  permanecerá en reposo. Dentro del sistema de referencia  $S^1$  se ubicará un dispositivo experimental, que consiste de un arreglo de espejos con un láser y un detector, dispuestos como se muestra en la figura (3.2).



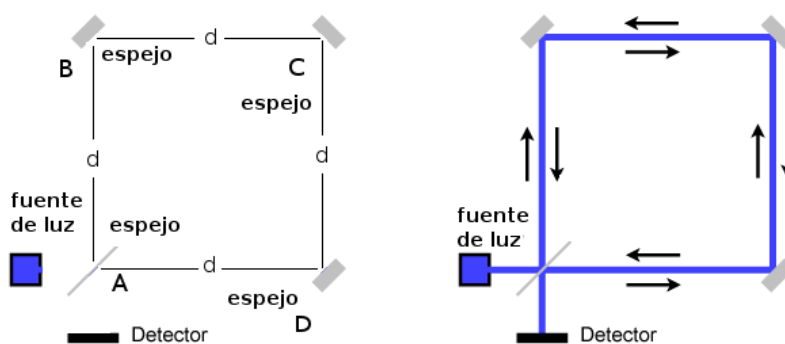


Figura 3.2: Dispositivo experimental ubicado en el sistema de referencia  $S^1$ .

A continuación se describirán los componentes del dispositivo experimental que se propondrá a los estudiantes. El espejo ubicado en A será parcialmente reflectante y tiene la función de dividir un haz de luz a la mitad, por lo que cuando incida un rayo sobre él, la mitad del haz se dirigirá hacia arriba (en el eje  $Y^1$ , ver fig. 3.1) y la otra mitad hacia la derecha (en el eje  $X^1$ , ver fig. 3.1). Además se debe mencionar que la distancia entre todos los espejos es la misma,  $d$ , por lo que el arreglo de ellos forma un cuadrado.

La fuente de luz estará apagada y a partir de un instante,  $t^1 = 0$ , el observador  $O^1$  la pondrá en operación, de modo que el haz emitido por la fuente de luz incidirá en el espejo parcialmente reflectante que a su vez dividirá el haz inicial en dos haces, uno de ellos se dirigirá hacia el espejo B y el otro hacia el espejo D. El primer haz hará un ciclo en sentido de las manecillas del reloj (ABCDA) hasta llegar nuevamente al espejo parcialmente reflectante, en donde se reflejará para dirigirse al detector; mientras que el otro haz hará el recorrido en contra de las manecillas del reloj (ADCBA) hasta llegar al espejo parcialmente reflectante por el cual se transmitirá para llegar finalmente al detector.

Para analizar el fenómeno de simultaneidad, es de utilidad recordar la enunciación del mismo a inicios de la sección 3.1. Allí se pueden detectar como componentes esenciales los sistemas de referencia, dos eventos, la ubicación espacial de ellos, y dos señales luminosas.

En el dispositivo experimental propuesto (ver figura 3.2) se consideran los sistemas de referencia  $S$ , en reposo, y  $S^1$  moviéndose con velocidad  $v$  en la dirección del eje  $x$  positivo. En este experimento se pueden distinguir diferentes eventos: para el haz que recorre el circuito en el sentido de las

manecillas del reloj ( $ABCD$ ) el primer evento es cuando el haz se refleja en el espejo  $A$ , al cual se le denotará como  $a$ , el segundo evento será la reflexión en  $B$  y se denotará como  $b$ , la reflexión en  $C$  como  $c$ , en  $D$  como  $d$  y al regresar nuevamente a  $A$  se le denotará como  $sd$ . Para el caso del haz que recorre el circuito en sentido contrario a las manecillas del reloj ( $ADCBA$ ) tendremos los eventos  $a'$ ,  $d'$ ,  $c'$ ,  $b'$  y  $sc$  que denotan las reflexiones en los espejos  $A$ ,  $D$ ,  $C$ ,  $B$  y  $sc$  es cuando el haz termina nuevamente en el espejo  $A$  al finalizar el ciclo.

Los eventos dentro del experimento en los cuales se puede distinguir el fenómeno de la simultaneidad son, por ejemplo, el evento  $b$ , que corresponde al haz que recorre el circuito  $ABCD$  en el sentido de las manecillas del reloj y el evento  $d'$ , para el haz que recorre el circuito  $ADCBA$  en sentido contrario.

Cabe señalar que la elección del arreglo mostrado en la figura (3.2) se elige porque en las ideas previas reportadas en los artículos del cuadro 1.1, se menciona que algunos estudiantes no distinguen que los efectos relativistas tienen lugar únicamente en las direcciones donde hay movimiento, mientras que en las direcciones donde no lo hay los fenómenos relativistas no se presentan, es decir que en las direcciones ( $y$  y  $z$ ) perpendiculares a la velocidad ( $v$ ) del sistema de referencia  $S$  (ver figura 3.1) no se podrá considerar, por ejemplo, la contracción de las longitudes. Entonces, con la situación planteada mediante el arreglo de la figura (3.2) se espera detectar si los estudiantes distinguen esta diferencia en la situación que se les propone y evaluar el modelo que construyan a lo largo de la ED.

Una vez presentado lo que se entenderá en este trabajo por modelos, modelización y junto con la postulación del fenómeno elegido y la situación en la que se enmarcará este, se puede dar paso a elaborar el modelo del fenómeno en términos de:

- **Modelo Científico Experto (MCE):** descripción en términos de modelos según la ciencia erudita.
- **Modelo Curricular (MC):** inferencia en término de modelos tomando como referencia el currículo .
- **Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial):** inferencia en término de modelos,

Cuadro 3.1: *Entidades y propiedades del Modelo Científico Experto.*

Entidades	Propiedades
Sistemas de referencia	Pueden ser inerciales o no inerciales, además se considera que son cartesianos.
Observadores	Son independientes de los sistemas de referencia, independientes entre sí (es decir que una medición en un sistema será independiente de la medición en otro sistema).
Luz	Es una onda electromagnética (compuesta por campos eléctricos y magnéticos variables) su velocidad en el vacío es igual para todo sistema de referencia ( $c = 3 \times 10^8 m/s$ ).
Instrumentos de medición / detección	Se considerará que el detector sólo da cuenta del momento en que llega cada rayo de luz.
Tiempo	Es relativo respecto a los observadores, depende del estado de movimiento del sistema de referencia donde estén situados, las mediciones del tiempo en sistemas inerciales se relacionan mediante las transformaciones de Lorentz.
Espacio	El espacio y el tiempo forman un 'nuevo espacio' conocido como el espacio de Minkowsky; que consta de las coordenadas espaciales y la cuarta coordenada dada por el producto de la velocidad de la luz por el tiempo ( $ct$ ). Se dice que este espacio es plano y semieuclidiano, en este espacio la forma de medir la separación entre puntos de este espacio -conocidos como eventos- se hace mediante la norma de Minkowsky.

Cuadro de construcción propia.

basada en las ideas previas de los estudiantes.

Los modelos antes mencionados son inferencias construidas de tres fuentes respectivamente: la ciencia erudita, el currículo y las ideas previas de los estudiantes (reportada en artículos especializados, ver cuadro 1.1). Tensionando los tres modelos se construye el Modelo Científico Escolar de Arribo (MCEA), que es la postulación del modelo que se pretende construyan los estudiantes al finalizar la Estrategia Didáctica.

### 3.3. MODELO CIENTÍFICO EXPERTO DEL FENÓMENO DE SIMULTANEIDAD

La explicación del MCE del fenómeno elegido, se hará en término de las **entidades**, las **propiedades** de dichos elementos, las **relaciones** que entre ellas existen, las **reglas de inferencia** y las **condiciones** necesarias para que el modelo acerca del fenómeno sea válido.

Cabe hacer la aclaración de que no es trivial asegurar si el tiempo como el espacio son entidades con un estatus ontológico. Por tal razón se recomienda revisar el texto de Pérez (2016 a), donde se

hace una revisión de la concepción del espacio y del tiempo desde el siglo XVII, cuando Galileo realizó estudios sobre el péndulo -que posteriormente se ocupó para medir el tiempo- hasta finales del siglo XX con el surgimiento de la Teoría de la Relatividad Especial que cambió por completo la concepción del tiempo y del espacio.

Después de los trabajos de Galileo se dice que hubo una revolución dentro de la ciencia, y gracias a sus avances se sentaron las bases para que otras personas contribuyeran al estudio de los fenómenos físicos, tal es el caso de Newton a quién se le atribuye el establecimiento de la mecánica clásica. Newton consideró al tiempo y al espacio como entidades independientes con la propiedad de ser homogéneos, es decir que sus características no cambiaban a lo largo de ellas. En el caso del tiempo Newton propuso que sólo se podían tomar en cuenta desplazamientos en una dirección, dado el avance del tiempo; mientras que para el espacio consideró posible avanzar en cualquier dirección en relación a un sistema cartesiano de tres ejes (tres dimensiones). El sistema cartesiano es de gran utilidad para representar las posiciones de los objetos, por tal motivo se emplea para denotar a sistemas de referencia inmersos en el espacio, que se considera como euclideo, es decir que se rige por los principios de Euclides.

En el caso de la TRE se dice que el espacio es localmente euclideo, por lo cual es posible mantener -parcialmente- las propiedades que se le asignan al espacio según la mecánica clásica. La diferencia radicaré en que dentro del marco de la TRE, el espacio y el tiempo conforman otro espacio de cuatro dimensiones conocido como espacio de Minkowsky, llamado así en honor al físico Hermann Minkowski que lo propuso. En dicho espacio de cuatro dimensiones se pueden describir todos los eventos posibles para la TRE y cabe señalar que esta construcción no fue considerada por Minkowsky como una entidad, sino como un formalismo útil para analizar (denotar, demostrar e interpretar según la propuesta del proceso de modelización) los fenómenos relativistas.

#### **Relaciones:**

- Las mediciones que se realicen en un sistema de referencia serán independiente de las mediciones hechas en otro sistema.

- Los sistemas de referencia son inerciales y equivalentes entre sí. Un sistema de referencia es inercial si se mueve a velocidad constante y su dirección no cambia, i.e. no está acelerado.
- Desde los sistemas de referencia los observadores realizan mediciones para determinar las propiedades de las entidades (masa, dimensiones, posición en el espacio) y para registrar eventos (tiempo, velocidad, etc.).
- Los observadores establecen los sistemas de referencia a conveniencia, con la finalidad de describir el comportamiento de un sistema o fenómeno.
- Los observadores miden cantidades físicas como: tiempo, longitudes, masa, etc., las mediciones que realicen son independientes de otros observadores y si se realizan en distintos sistemas de referencia pueden relacionarse las mediciones por medio de las transformaciones de Lorentz.
- Todo observador en un sistema de referencia inercial que mida la velocidad de la luz en el vacío obtendrá el mismo valor ( $c = 3 \times 10^8 m/s$ ).

#### **Reglas de inferencia:**

Como se mencionó en la sección 2.1.1, las reglas de inferencia comprenden el conjunto de leyes y principios que gobiernan a las entidades y los procesos dentro del modelo. En la Teoría de la Relatividad Especial ya no se pueden utilizar las leyes de Newton como se conocen en la mecánica clásica, debido a que con las transformaciones de Lorentz los intervalos de tiempo varían según el sistema de referencia donde se registren, lo cual afecta la forma en que se determinan tanto la velocidad como la aceleración de los cuerpos. De igual forma la masa tiene un carácter relativista; de este modo la segunda ley de Newton ( $F = ma$ ) ya no puede utilizarse para analizar los fenómenos relativistas.

El camino que se sigue es regresar a principios fundamentales como son la conservación de la energía, la conservación del momento lineal, etc., y además se buscan cantidades que permanezcan invariantes en todo sistema de referencia, es decir que no dependan del sistema desde el cual se

midan. Con lo anterior se logra deducir la dinámica de los cuerpos según la Teoría de la Relatividad Especial, así como relaciones fundamentales, tal es el caso de la relación entre la energía y la masa deducida por Einstein. En el presente trabajo sólo se abordará el fenómeno de la simultaneidad como consecuencia de las transformaciones de Lorentz, junto con la dilatación del tiempo y la contracción de las longitudes ya que están íntimamente relacionados dichos fenómenos. Dentro de las reglas de inferencia también deben considerarse las leyes del electromagnetismo.

**Condiciones:**

- Las leyes de la física son válidas para todos los sistemas de referencia inerciales (primer postulado de la TRE).
- No hay sistemas de referencia privilegiados (sistemas de referencia absolutos).
- La velocidad de la luz es invariante,  $c$ , sin importar el estado de movimiento de la fuente o de los sistemas de referencia donde se sitúen los observadores que miden su velocidad (segundo postulado de la TRE).
- Los efectos relativistas son despreciables para velocidades que no son comparables con la velocidad de la luz,  $v \ll c$ , y serán más evidentes conforme la velocidad de los objetos sea más cercana a la velocidad de la luz,  $v \approx c$ .
- La Teoría de la Relatividad Especial es válida únicamente para sistemas no acelerados, el caso general que incluye sistemas acelerados forma parte de la Teoría de la Relatividad General, que no se analizará en la Estrategia Didáctica.

Una vez determinadas las entidades con sus propiedades, las relaciones entre ellas, las reglas de inferencia y las condiciones del modelo, es posible explicar el fenómeno; dicha explicación se hará en primer lugar de forma cualitativa y posteriormente se incluirá la representación matemática del modelo.

En el instante  $t^1 = 0$ , el observador en el sistema de referencia en movimiento,  $S^1$ , prende la fuente de luz y ésta emite un rayo que incide sobre el espejo parcialmente reflectante  $A$  (ver figura

3.2), el haz inicial se divide en dos haces con trayectorias distintas, una en el sentido de las manecillas del reloj (circuito  $ABCD$ ) y la otra en sentido contrario a las manecillas del reloj (circuito  $ADCBA$ ). La distancia entre todos los espejos es la misma -según el observador en el sistema que se mueve con el dispositivo experimental.

Los eventos a considerar para analizar el fenómeno de la simultaneidad son: i) en primer lugar está el arribo del haz de luz que recorre el trayecto del espejo  $A$  al espejo  $B$ , evento  $b$ , y ii) el arribo del rayo que va del espejo  $A$  al espejo  $D$ , evento  $d'$ . Con la Teoría de la Relatividad Especial se predice que el observador situado en el sistema de referencia en movimiento,  $S^1$ , medirá el mismo tiempo de recorrido de ambos haces de luz, es decir que el tiempo de recorrido del espejo  $A$  al  $B$  será el mismo que el tiempo de recorrido de  $A$  a  $D$  y entonces ambos eventos serán simultáneos desde el sistema  $S^1$ . Por otro lado, el observador situado en el sistema de referencia en reposo,  $S$ , medirá que el tiempo de recorrido de los trayectos antes mencionados no es el mismo, por lo que no observará a ambos eventos simultáneos, ya que en este caso se interrelaciona la contracción de las longitudes en el eje  $x$  y también la dilatación del tiempo. Por esa razón el observador en reposo verá cosas distintas al observador que se mueve junto con el dispositivo.

Para tener una explicación más clara del modelo será de utilidad expresarlo matemáticamente, lo cual se hará a continuación.

### 3.3.1. Representación matemática del modelo, en el marco del arreglo experimental elegido

El observador situado en el sistema de referencia en movimiento detecta que ambos eventos,  $b$  y  $d'$ , son simultáneos, es decir, registra la llegada de ambos haces al mismo tiempo. En dicho sistema de referencia, el tiempo del recorrido del haz que viaja en sentido de las manecillas del reloj, al ir del espejo  $A$  al espejo  $B$  es igual al tiempo de recorrido del otro haz cuando va del espejo  $A$  a  $D$ , esto es  $t_{AB}^1 = t_{AD}^1 = \frac{d}{c}$ , además observa que el recorrido de ambos rayos, en sentido de las manecillas del reloj y en contra, recorren el circuito completo en el tiempo

$$t^1 = 4 \frac{d}{c} \quad (3.25)$$

Por otro lado, para determinar lo que se observa en el sistema de referencia en reposo,  $S$ , será necesario hacer un análisis más cuidadoso y para ello se utilizaran las transformaciones de Lorentz.

En primer lugar el observador en el sistema en reposo,  $S$ , verá que el haz que recorre el circuito en el sentido de las manecillas del reloj, al viajar el segmento que comprende del espejo  $A$  al espejo  $B$ , evento  $b$ , viaja una distancia  $l$ , ver figura 3.3, y el tiempo que tarda el rayo en recorrerla dicha distancia es

$$t_{AB} = \frac{l}{c} = \frac{\sqrt{(vt_{AB})^2 + d^2}}{c} \quad (3.26)$$

despejando el tiempo de la ecuación (3.26) se obtiene

$$t_{AB} = \frac{d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.27)$$

recordando que  $t_{AB}^1 = \frac{d}{c}$ , la ecuación (3.27) se reescribe del siguiente modo

$$t_{AB} = t_{AB}^1 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.28)$$

De la ecuación (3.28) se puede observar que el tiempo detectado por el observador en el sistema de referencia en reposo  $S$ , es mayor que el detectado por el observador en el sistema que se mueve con velocidad  $v$ ,  $S^1$ . A este fenómeno se le conoce como la dilatación del tiempo.

Ahora, analizando el evento  $d'$ . El observador situado en el sistema de referencia en movimiento detecta que el tiempo de trayecto que tarda el haz para recorrer la distancia  $d$ , del espejo  $A$  al espejo  $D$ , es  $t_{AD}^1 = \frac{d}{c}$ . Para determinar el tiempo que detecta el observador desde el sistema de referencia en reposo,  $S$ , se puede utilizar la transformación de Lorentz para el tiempo (ec. 3.22). Se considerará que el haz parte del espejo  $A$  al tiempo  $t_A$  y el tiempo que tarda en llegar al espejo  $D$  es  $t_D$ ; entonces el intervalo de tiempo del trayecto es  $t_{AD} = t_D - t_A$



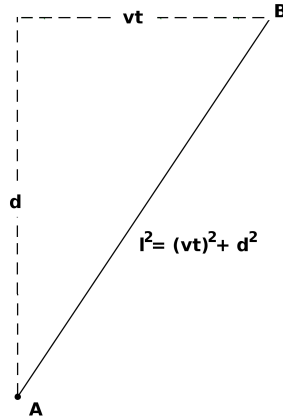


Figura 3.3: análisis del evento  $b$ , desde el sistema de referencia en reposo.

$$\begin{aligned}
 t_{AD}^1 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left( t_D - \frac{vx}{c^2} - \left( t_A - \frac{vx}{c^2} \right) \right) \\
 &= \frac{t_{AD}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

entonces el intervalo de tiempo registrado desde el sistema de referencia en reposo será

$$t_{AD} = t_{AD}^1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{3.30}$$

donde  $t_{AD}^1 = \frac{d}{c}$ .

Al comparar las ecuaciones (3.28) y (3.30) se puede notar que  $t_{AB} > \frac{d}{c}$ , mientras que  $t_{AD} < \frac{d}{c}$  y por lo tanto se puede concluir que  $t_{AD} < \frac{d}{c} < t_{AB}$ , entonces el tiempo que tarda el haz en el sentido de las manecillas del reloj, al ir del espejo  $A$  al espejo  $B$  será mayor que el tiempo de recorrido para el haz que viaja en sentido contrario a las manecillas del reloj, del espejo  $A$  al espejo  $D$ . Así se concluye que el observador situado en el sistema de referencia en reposo no detecta los dos eventos ( $b$  y  $d'$ ) simultáneamente, mientras que el observador dentro del sistema de referencia en movimiento si lo hará.

Una forma alternativa de analizar el evento  $d'$  es haciendo uso del segundo postulado de la TRE, junto con la ecuación

$$t_{AD} = \frac{l_{AD}}{c} \quad (3.31)$$

donde  $l_{AD}$  es la distancia que recorre el haz de luz para ir del espejo  $A$  al espejo  $D$ . Utilizando la transformación de Lorentz (ec. 3.21) podemos determinar el valor de  $l_{AD}$  que mide el observador desde el sistema de referencia en reposo,  $S$ . Considerando que la posición del espejo  $A$  es  $x_A^1$  y la posición del espejo  $D$  es  $x_D^1$ , desde el sistema de referencia que se mueve con velocidad  $v$  en la dirección  $x$ , y que la longitud del trayecto es  $d = x_D^1 - x_A^1$  junto con la transformación de coordenadas ecuación (3.21) se obtiene

$$\begin{aligned} d &= x_D^1 - x_A^1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x_D - vt - (x_A - vt)) \\ &= \frac{x_D - x_A}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

donde  $l_{AD} = x_D - x_A$ . Al despejar  $l_{AD}$  de la ecuación (3.32), se obtiene que  $l_{AD} = d \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , con lo cual se puede determinar que el observador en el sistema en reposo,  $S$ , detecta una longitud del trayecto  $AD$  menor a la que detecta el observador situado en el sistema en movimiento,  $S^1$ . Al fenómeno anterior se le conoce como la contracción de la longitud. Ahora sustituyendo  $l_{AD}$  en la ecuación (3.31) se obtiene

$$t_{AD} = \frac{l_{AD}}{c} = \frac{d}{c} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = t_{AD}^1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3.33)$$

que es el mismo resultado que se encontró en la ecuación (3.30). Con lo anterior podemos ver que tanto el fenómeno de la dilatación del tiempo, como el de la contracción de las longitudes están relacionados con el fenómeno de la simultaneidad.

Por último, a continuación se analizará cuál es el tiempo del recorrido completo que mide el observador en el sistema de referencia en reposo,  $S$ . Primero recordemos que el observador en el sistema de referencia que se mueve con velocidad  $v$  -donde está situado el dispositivo experimental- mide el tiempo del recorrido del haz de luz  $ABCD A$  igual al tiempo del recorrido  $ADCBA$ , es decir que

$$\begin{aligned}
 t_{ABCD A}^1 &= t_{AB}^1 + t_{BC}^1 + t_{CD}^1 + t_{DA}^1 \\
 &= 4 \frac{d}{c} \\
 &= t_{AD}^1 + t_{DC}^1 + t_{CB}^1 + t_{BA}^1 \\
 &= t_{ADCBA}^1
 \end{aligned}$$

Para analizar el tiempo de recorrido que mide el observador en el sistema de referencia en reposo, se debe considerar que

$$t_{AB} = t_{BA} = t_{CD} = t_{DC} = t_{AB}^1 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t_{AD} = t_{DA} = t_{CB} = t_{BC} = t_{AD}^1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

como  $t_{AB}^1 = t_{AD}^1 = \frac{d}{c}$  se obtiene que el tiempo de recorrido en ambos sentidos ( $ABCD A$  y  $ADCBA$ ) será

$$\begin{aligned}
 t_{ABCD} &= 2t_{AB} + 2t_{AD} \\
 &= 2t_{AB}^1 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \right) \\
 &= 2\frac{d}{c} \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \right) \tag{3.34}
 \end{aligned}$$

Analizando el tiempo de recorrido medido desde el sistema de referencia en reposo (ecuación 3.34) se puede observar que para velocidades ( $v$ ) pequeñas, los tiempos de recorrido en el sistema  $S$  y  $S^1$  son iguales,  $t_{ABCD} \approx 4\frac{d}{c} = t_{ABCD}^1$ .

Por otro lado, conforme la velocidad ( $v$ ) crece el término  $\frac{v^2}{c^2}$  irá creciendo hasta aproximarse a 1. Analizando la suma de los términos  $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ , vemos que crecerá conforme las velocidades ( $v$ ) sean mayores que cero ( $v > 0$ ); en cuyo caso  $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} + \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} > 2$ . Mientras que si la velocidad  $v$  se acerca a la velocidad de la luz ( $c$ ) dicha suma tenderá a infinito. Por lo anterior podemos decir que el tiempo que mide el observador en el sistema en reposo ( $S$ ) será mayor al que mide el observador en el sistema en movimiento ( $S^1$ ), es decir  $t_{ABCD} > t_{ABCD}^1$ .

### 3.4. DISCUSIÓN DE LOS ANTECEDENTES ACADÉMICOS DE LOS ALUMNOS PARA ABORDAR LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

En ésta sección se presenta la construcción del modelo curricular tomando como referencia el programa de estudios de la materia de Electromagnetismo I, que se cursa en cuarto semestre de la Licenciatura en Física, en la Facultad de Ciencias de la UNAM (Facultad de Ciencias, s.f.a).

### 3.4.1. Contexto curricular para abordar la Teoría de la Relatividad Especial

#### 3.4.1.1. *Antecedentes académicos, previos al curso de Electromagnetismo I*

En el Plan de Estudios de la materia de Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d), se hace explícito como requisito para llevar el curso, acreditar previamente las materias de mecánica vectorial (2do semestre), laboratorio de mecánica (2do semestre), cálculo diferencial e integral I (1er semestre), cálculo diferencial e integral II (segundo semestre) y cálculo diferencial e integral III (tercer semestre).

A continuación se presentan algunos temas marcados en el Plan de Estudios de la materia de mecánica vectorial (Facultad de Ciencias, s.f. b), con la intención de establecer lo que en teoría los alumnos saben después de aprobar este curso. Estos temas se eligen ya que pueden considerarse como conocimientos previos necesarios para abordar el tema de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE).

#### **Mecánica vectorial:**

- Las variables básicas de descripción en la mecánica. Medición de distancias y procedimientos de medición
- Movimiento (velocidad y aceleración) para movimientos rectilíneos, curvilíneos y circulares, descripción vectorial (componentes tangencial y normal de la velocidad y la aceleración)
- Leyes de Newton
- Relatividad galileana
- Trabajo y energía, fuerzas conservativas y conservación de la energía
- Interacción gravitacional, masa inercial y gravitacional, principio de equivalencia Galileano (antecedente para el principio de equivalencia de Einstein)

Con los puntos antes señalados se infiere que los alumnos estén ampliamente familiarizados con: marcos de referencia, movimiento relativo y las transformaciones de Galileo. Además de mecánica

vectorial, los alumnos cursan en 2do semestre un laboratorio de mecánica, a continuación se presenta lo más relevante del temario de dicha materia (Facultad de Ciencias, s.f.c).

**Laboratorio de mecánica vectorial:**

- Definición de medición
  
- Representación gráfica de los modelos físicos: identificación de variables independientes y dependientes, ejes coordenados
  
- Modelos empíricos y teóricos. Construcción de modelos empíricos e intervalo de validez de los modelos empíricos. Construcción de modelos teóricos, planteamiento de hipótesis, derivación del comportamiento del sistema de acuerdo a las hipótesis, y su confrontación con el comportamiento experimental

Se podría decir que en la unidad 11 del laboratorio de mecánica se establece que los alumnos al cursar esta materia adquieren cierto dominio en la construcción de modelos empíricos (especificando su rango de validez), modelos teóricos (a partir de hipótesis) y su evaluación con la evidencia experimental. Entonces cabe hacerse la siguiente pregunta: **¿qué noción tienen los estudiantes acerca de lo que es un modelo y acerca de la función que éstos tienen en la construcción del conocimiento científico?** Lo anterior aporta elementos para incorporar esta pregunta a la Estrategia Didáctica, con la finalidad de explorar las ideas de los estudiantes acerca de los modelos. A partir de ello se podrían detonar otras actividades, encaminando el trabajo para lograr que los alumnos construyan una noción de lo que es un modelo.

Analizando los antecedentes expresados en el currículo, previos al cuarto semestre, es posible postular el modelo que podrían construir los alumnos antes de cursar la unidad referente a la relatividad especial, del curso de Electromagnetismo I. A continuación se expresa dicho modelo y posteriormente se propondrá el Modelo Curricular cuando los alumnos hayan abordado la TRE en el curso.

### 3.4.2. Modelo Curricular sobre el fenómeno de simultaneidad, antes de abordar la Teoría de la Relatividad Especial

A partir de lo que se discutió en la sección 3.4.1.1, se postulará el modelo que los alumnos podrían construir previo al curso de Electromagnetismo I. Dicha construcción estará en términos de las entidades, las propiedades (de las entidades), sus relaciones, las reglas de inferencia y las condiciones para el fenómeno de simultaneidad que se describió.

Cuadro 3.2: *Entidades y propiedades del Modelo Curricular antes de abordar la TRE.*

Entidades	Propiedades
Sistemas de referencia	Pueden ser inerciales o no inerciales, son cartesianos
Observadores	Son independientes de los sistemas de referencia, independientes entre sí, lo que significa que una medición en un sistema será independiente de la medición en otro sistema.
Luz	Es una onda electromagnética, es decir que se compone por campos eléctricos y magnéticos variables, su velocidad en el vacío es igual para todo sistema de referencia ( $c = 3 \times 10^8 m/s$ )
Instrumentos de medición/detección	Se considerará que el detector sólo da cuenta del momento en que llega cada rayo de luz
Tiempo	Es absoluto, transcurre de la misma forma para todos los observadores, sin importar el estado de movimiento del sistema de referencia donde se sitúen
Espacio	El espacio es homogéneo, absoluto y se dice que es Euclideo

Cuadro de construcción propia.

#### Relaciones:

Entre los elementos que se espera que reconozcan los estudiantes corresponden a las que establece la mecánica clásica (física clásica en general):

- Los sistemas de referencia son fijados a conveniencia para determinar la posición de los objetos del universo
- Desde los sistemas de referencia los observadores realizan mediciones para determinar las propiedades de las entidades (masa, dimensiones, posición en el espacio) y para registrar eventos (tiempo, velocidad, etc.)
- Las mediciones que realizan observadores en distintos sistemas de referencia son independientes de otros observadores y se relacionan mediante las transformaciones de Galileo

- El tiempo y el espacio son independientes
- los eventos que sean simultáneos para un observador, serán de igual modo simultáneos para todos los demás observadores

**Reglas de inferencia:**

- Las leyes de Newton
- Las leyes del electromagnetismo

**Condiciones:**

No se espera que los estudiantes conozcan condiciones propias de la TRE, ya que no hay contenido de la TRE, previo a este curso de Electromagnetismo I.

A continuación se presentarán un análisis de la unidad donde se aborda la TRE, dentro del programa de la materia de Electromagnetismo I. La intención de hacer esto es de analizar la pertinencia del mismo, con base en los resultados que se reportan en los artículos del cuadro (1.1) ubicado en la sección 1.2.1, relativos a las ideas previas de los estudiantes y al diseño de Estrategias Didácticas sobre aspectos de la TRE y para abordar la misma en el aula con estudiantes.

En la siguiente sección se expondrá el modelo que se infirió, de los artículos expuestos en la tabla (1.1). Dicha construcción servirá para mostrar la existencia de un problema en la enseñanza de la ciencia y de la forma que aprenden los alumnos.

### **3.5. MODELO COGNITIVO DE LOS ALUMNOS INICIAL, SOBRE EL FENÓMENO DE SIMULTANEIDAD**

En las investigaciones expuestas en el cuadro (1.1) se buscó el reporte de ideas previas de los alumnos, y a partir de ellas es que se infirió el Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial). La información contenida en dichos artículos se organizó con la finalidad de sistematizarla e hizo posible detectar siete categorías o asuntos que permiten agrupar las ideas previas. Al realizar



este trabajo se encontró que dichas categorías pueden proponerse a partir de la propia Teoría de la Relatividad Especial, lo cual coincide con lo reportado por Arriassecq y Greca (2012) al recabar ideas previas de los estudiantes sobre la TRE. Las categorías son en si, las entidades del modelo y, las ideas previas de los alumnos sirven para determinar sus propiedades, relaciones y condiciones.

Cuadro 3.3: Entidades y propiedades del Modelo Cognitivo de los Alumnos al iniciar la ED.

Entidades	Propiedades	referencias
Sistemas de referencia	Se entiende como observador al que <i>registra los fenómenos de manera objetiva</i> .	Alemañ y Pérez, 2000; Arriassecq y Greca (2012), Dimitriadi y Halkia (2012), Guisasola, Barragues, Morentin y Moreno (2009) Hewson (1982), Pietrocola y Zylbersztajn (1999), Posner (1982), Villani y Pacca (1987, 1990).
Observadores	Se confunde al observador con el sistema de referencia. Por ejemplo si se tiene una nave espacial y un observador dentro de ella, <i>los alumnos tratan indistintamente al sistema que se mueve y al observador como lo mismo</i> .	
Instrumentos de medición o detección	Debido a la discrepancia entre las predicciones de la TRE, con respecto a la dilatación del tiempo y la contracción de las longitudes, los estudiantes pueden pensar que estas se deben a <i>fallas en los instrumentos de medición</i> , o que deben existir <i>compensaciones en ellos</i> para que los observadores registren lo mismo.	
Luz	Se tiene un idea equivocada de lo que significa la invarianza de la velocidad de la luz (la velocidad de la luz en el vacío es $c = 3 \times 10^8 m/s$ para todos los sistemas de referencia). También los estudiantes mencionan que al ser invariante <i>la luz viaja uniformemente en todas direcciones</i> y algunos estudiantes piensan que <i>dicha velocidad no tiene ningún límite en su valor</i> .	Scherr, Shaffer y Vokos (2001, 2002), Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009).
Tiempo	En algunos casos los alumnos no pueden definir qué es el tiempo y <i>sólo tienen ideas vagas de los contextos en los que se usa</i> . Mientras que <i>para la dilatación del tiempo se utilizan analogías con fenómenos clásicos</i> para explicar este fenómeno, además se tiene una idea del <i>tiempo como algo absoluto</i> y que <i>debe existir una única medición de él</i> , que es la concepción clásica.	Alemañ y Pérez (2000), Arriassecq y Greca (2012), Dimitriadi y Halkia (2012), Selcuk (2011), Villani y Pacca (1987).
Espacio	Existen dificultades para definir qué es el espacio, <i>se niega la contracción de la longitud</i> o se adjudica a efectos ópticos; también se trata de explicar la contracción de la longitud utilizando <i>razonamientos de la mecánica clásica</i> .	Alemañ y Pérez (2000), Arriassecq y Greca (2012), Dimitriadi y Halkia (2012), Selcuk (2011), Villani y Pacca (1987).

Cuadro de construcción propia.

A continuación se presentarán las relaciones entre las entidades, las reglas de inferencia del modelo y las condiciones de validez del mismo.

**Relaciones:**

La única relación que queda patente en las ideas previas de los estudiantes es que los observa-

dores son los que detectan los eventos, miden cantidades como velocidad, longitud y tiempo.

**Reglas de inferencia:**

Los estudiantes mantienen una visión clásica, por lo que se puede decir que las reglas de inferencia serían en el fondo las leyes de Newton y las leyes del electromagnetismo.

**Condiciones:**

Los alumnos no mencionan condiciones para que se presenten fenómenos como: contracción de la longitud, dilatación del tiempo, simultaneidad relativa, masa relativista.

La explicación el fenómeno de la simultaneidad se puede inferir a partir de los hallazgos reportados en las investigaciones listadas en el cuadro 1.1, sección 1.2.1, junto con las entidades del modelo y sus propiedades, a continuación se presenta la inferencia de la explicación como parte del Modelo Cognitivo de los Alumnos.

**Explicación del fenómeno de Simultaneidad**

La visión sobre simultaneidad que se infiere de los resultados de las investigaciones del cuadro 1.1 estará en desacuerdo con la TRE, ya que se argumenta que ésta puede ser causada debido a que los observadores no se ponen de acuerdo en lo que registran (Arriasecq y Greca, 2012). También se reporta que los estudiantes, al incorporar la relatividad de la simultaneidad en sus explicaciones, lo hacen de modo que puedan mantener la creencia sobre la simultaneidad absoluta, esto lo hacen al considerar que el instante en que un observador registra un evento, determina el tiempo en que sucede; mientras que la relatividad de la simultaneidad se atribuye al tiempo que le toma a una señal, luminosa, viajar del evento registrado hacia los observadores (Scherr, Shaffer y Vokos, 2001; 2002). Es decir, la detección de dos eventos -por observadores distintos- depende del tiempo -de retraso- que le tome a la luz -o señales- viajar del lugar donde suceden los eventos a los observadores en distintos sistemas de referencia.

A continuación se presentarán tanto el Modelo Curricular (MC) como el Modelo Científico Escolar de Arribo (MCEA). En el primer caso, dicho modelo nos sirve para postular la posible construcción de los alumnos, después de abordar la unidad 10 del curso de Electromagnetismo I. Por otro lado el MCEA es la hipótesis de lo que los estudiantes construirán al finalizar la ED.

### 3.5.1. Simplificación del programa de estudio propuesto para abordar la TRE en la materia de Electromagnetismo I.

Con base en los hallazgos sobre ideas previas de los estudiantes sobre aspectos de la TRE, expuestos en la sección "Investigaciones en Educación en Ciencias, relativas a ideas previas y Estrategias Didácticas sobre aspectos de la Teoría Especial de la Relatividad Especial" (1.2.1), se puede postular que no todos los alumnos tendrán un buen manejo de los elementos de la mecánica clásica, aún cuando ya hayan tomado cursos de ello. Específicamente es importante que los estudiantes puedan describir el movimiento de un objeto desde cualquier sistema de referencia inercial para poder ahondar en la TRE con los alumnos. En este sentido, se hace necesario analizar el temario de la unidad 10 del curso de Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d) para determinar la pertinencia del mismo, en relación al conocimiento previo de los alumnos y lo que se esperaría que construyeran al finalizar dicha unidad.

En el cuadro (3.4) se presenta el programa de la unidad 10 de Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d) y posteriormente se hará una discusión con la idea de discernir los puntos de los que se puede prescindir.

Cuadro 3.4: Programa de la unidad 10 del curso de electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f.d) de la Licenciatura en Física de la UNAM, tomado de Facultad de Ciencias, s.f. d.

10. TEORÍA DE LA RELATIVIDAD Y ELECTRODINÁMICA (18 h)
10.1 Las ecuaciones de Maxwell y las transformaciones de Galileo
10.2 Experimento de Michelson - Morley
10.3 Postulados de la Teoría Especial de la Relatividad
10.4 Transformaciones de Lorentz
10.5 Algunas consecuencias de las transformaciones de Lorentz. Ejemplos y paradojas
10.6 Cinemática relativista: Adición de velocidades; efecto Doppler
10.7 Cuadrivectores. Tensores. Operaciones tensoriales y tensor de Faraday
10.8 Dinámica relativista: cuadrivectores de cantidad de movimiento- energía
10.9 Campo de una carga puntual en movimiento uniforme. Interdependencia del campo eléctrico y magnético

Examinando el programa de la unidad 10 (cuadro 3.4) se puede notar que es importante que los alumnos conozcan las ecuaciones de Maxwell y la ecuación de onda (que describen a las ondas electromagnéticas), ya que el segundo postulado (carácter constante de la velocidad de la luz en el

vacío para todo sistema de referencia inercial) surge de la no invarianza de las ecuaciones de Maxwell ante las transformaciones de Galileo, razón por la cual se buscó otro tipo de transformaciones que sí cumplieran con dicha condición (mantener invariantes las ecuaciones de Maxwell). Esto dio origen a las transformaciones de Lorentz, con las que es posible derivar las consecuencias de la TRE (contracción de la longitud, dilatación del tiempo, simultaneidad relativa, etc.).

Posteriormente se incluye el experimento de Michelson-Morley con la finalidad de dejar ver a los estudiantes la incompatibilidad entre las predicciones hechas por la mecánica clásica y las hechas con la TRE. Una vez hecho lo anterior surge la necesidad de introducir un nuevo elemento, razón por la que se puede inferir que se incluyen los postulados de la TRE, con los cuales es posible deducir las transformaciones de Lorentz para sustituir a las de Galileo. Con las nuevas transformaciones se obtienen predicciones que contradicen a las de la mecánica clásica, por esto se indica en el temario revisar las consecuencias de las nuevas transformaciones y luego mediante el uso de éstas se puede derivar la cinemática relativista.

Se puede decir que el temario sugerido en el Plan de Estudios es muy amplio para cubrirlo en el tiempo que se marca, tomando en cuenta los resultados de las investigaciones expuestos en el cuadro (1.1). Principalmente se pueden retomar los resultados de Villani y Pacca (1987; 1990) quienes trabajaron con alumnos de posgrado y encontraron que las explicaciones de los estudiantes ante situaciones relativistas no logran ser totalmente consistentes con la TRE. Esto pone de relieve la necesidad de limitar el contenido de la unidad 10 del curso de Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d), para que los modelos de los alumnos sean cercanos a los de la ciencia erudita y a partir de eso aspirar a que los modelos de los alumnos sean cada vez más complejos por medio de representaciones matemáticas más avanzadas, como lo son los tensores.

Por lo antes expuesto, se tomará la decisión de eliminar puntos de la unidad 10 para simplificar el temario. En primer lugar se dejara fuera de la secuencia didáctica el experimento de Michelson-Morley (10.2, cuadro 3.4), debido a que éste se realiza con un instrumento conocido como interferómetro de Michelson-Morley, que en un inicio se utilizó para determinar la velocidad relativa de la luz respecto al sistema de referencia de la Tierra. La hipótesis central para este experimento era

la existencia del éter como sistema de referencia absoluto y los resultados experimentales no concordaron con la hipótesis antes mencionada. Así se demostró que el éter no existe y, de forma más amplia se demostró la no existencia de un sistema de referencia absoluto en donde la velocidad de la luz fuera constante (Rahaman, 2014). La hipótesis del éter se propuso para intentar conciliar la inconsistencia entre las transformaciones de Galileo con las ecuaciones de Maxwell; por lo que se postula que al presentar el modelo donde interviene el éter pueda existir que haya confusión en los alumnos. Para evitar lo anterior se abordará con los alumnos lo que se discutió en la sección 3.1.1.3, donde se analizó a los sistemas de referencia privilegiados en relación a los fenómenos que utilizan sistemas de referencia privilegiados para explicar fenómenos como las ondas electromagnéticas o el movimiento de un cuerpo a través de un fluido.

Otras de las dificultades para introducir como fenómeno detonante a la simultaneidad con el experimento de Michelson-Morley es que se debe entender el funcionamiento del interferómetro, lo cual requiere conocimientos de óptica física (la versión electromagnética de la óptica) y esto hace más complicada la presentación y discusión de la TRE, ya que el resultado del experimento se interpreta utilizando interferometría (interferencia entre ondas electromagnéticas).

También se descartarán las paradojas de la TRE, ya que como lo mencionan Scherr, Shaffer y Vokos (2002) es necesario que los estudiantes tengan un papel activo en la confrontación de sus ideas con las posibles contradicciones entre su intuición y lo que predice la teoría. De este modo, del punto 10.5 sólo se abordarían las consecuencias de las transformaciones de Lorentz y conforme se vaya avanzando en el manejo de las mismas. Dentro de las consecuencias se considerará en punto 10.6 "Cinemática relativista: Adición de velocidades; efecto Doppler".

También se puede descartar el punto 10.7 con el que se pretende que los alumnos aprendan a hacer uso de tensores, así como las operaciones tensoriales y el tensor de Faraday, para dejar solamente el uso de cuadvectores. En el cuadro (3.5) se muestran los temas que sugiere el plan de estudios y una simplificación que se considera más pertinente, para los propósitos de establecer un MCEA más cercano al MCE.

Cuadro 3.5: *Simplificación propuesta del mapa curricular de la TRE.*

10.1 Las ecuaciones de Maxwell y las transformaciones de Galileo (Lo más importante de este punto es lograr que los estudiantes detecten la incompatibilidad de las transformaciones de Galileo con los fenómenos electromagnéticos, por esa razón será necesario abordar los sistemas privilegiados)
10.3 Postulados de la Teoría Especial de la Relatividad (Este punto es relevante debido a que básicamente estas son las condiciones para un modelo de la TRE)
10.4 Transformaciones de Lorentz (estas transformaciones son fundamentales para deducir las consecuencias de la TRE)
10.5 Algunas consecuencias de las transformaciones de Lorentz: contracción de la longitud, dilatación del tiempo, simultaneidad relativa

### 3.6. POSTULACIÓN DE LOS MODELOS, CURRICULAR Y CIENTÍFICO ESCOLAR DE ARRIBO, SOBRE EL FENÓMENO DE LA SIMULTANEIDAD

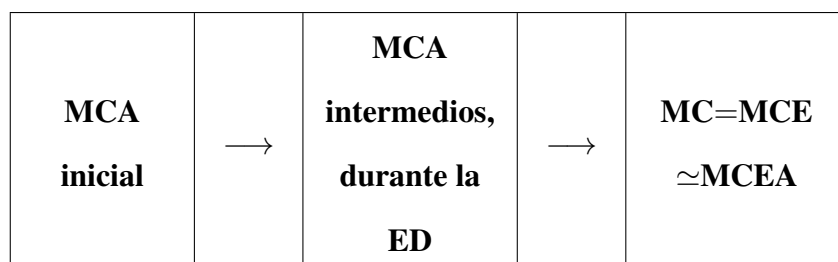
En la sección 3.3, se expuso el Modelo Científico Experto (MCE) del fenómeno de simultaneidad, mientras que en la sección 3.4 se analizaron los antecedentes necesarios para abordar la TRE y, se propuso el modelo que construirían los alumnos antes de cursar la unidad 10 de la asignatura Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d). En la siguiente sección (3.5) se postuló el Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial), el cual se infirió a partir de las ideas previas de los alumnos reportadas en los artículos de investigación expuestos en la sección 1.2.1.

Como se mencionó anteriormente, sección 3.4.1, para el cuarto semestre, los alumnos de física ya llevaron tres cursos de cálculo, lo que permite suponer que los estudiantes tienen un buen manejo del formalismo matemático necesario para desarrollar una representación matemática del modelo de la simultaneidad, tal como se hizo en la sección 3.3.1. Cabe mencionar que las herramientas que los alumnos manejarán son principalmente algebraicas -ya que las transformaciones de Lorentz se manipulan de ese modo. Además se debe mencionar que la elección de la situación en la cual está enmarcada la simultaneidad relativista se eligió de modo que los efectos relativistas se presenten en una sola dimensión, lo anterior simplifica el desarrollo matemático para construir la representación matemática del modelo.

Dado el nivel educativo que se eligió para trabajar en esta aportación -Licenciatura en Física-, es oportuno postular que: *después de abordar la unidad diez del curso de Electromagnetismo I (Facultad de Ciencias, s.f. d) con la Estrategia Didáctica presentada en este trabajo, los estudiantes podrán construir un modelo que les permita representar y explicar el fenómeno de la simultaneidad, tal como se hace en la ciencia erudita.* Lo anterior es plausible dado que se realizó una simplificación curricular (ver 3.5) y además se eligió una situación simplificada para abordar el fenómeno de simultaneidad que hace posible postular tal afirmación.

Con la simplificación antes mencionada se propicia que los contenidos a abordar no se alejen demasiado del punto de partida de los estudiantes (ver la postulación del Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial, MCA inicial), de forma que tanto para los alumnos como para el profesor se facilite la construcción de un modelo similar al MCE. Por lo anterior se postula que:

**El Modelo Curricular (MC) será igual al Modelo Científico Experto (MCE) (expuesto en la sección 3.3) y a su vez, el Modelo Científico Escolar de Arribo (MCEA) será similar al MC** -el MCEA es la construcción que se supone realizarán los estudiantes al finalizar la ED. Cabe señalar que el grado de cercanía entre el MCEA y el MC dependerá del desarrollo de la ED, del acompañamiento del profesor y del trabajo de los alumnos, asumidos ellos mismos como agentes activos en la construcción del conocimiento. Lo anterior se puede mostrar en el siguiente esquema que representa el tránsito que se postula con los modelos de los estudiantes, producto del diseño y aplicación de la Estrategia Didáctica.



Cuadro de construcción propia.

Dada la argumentación anterior, se refiere al lector a la sección (3.3) para ver a detalle el Modelo Científico Experto, que es igual al Modelo Curricular y que se postula posible su construcción por

parte de los estudiantes al finalizar la ED, dicha construcción es el Modelo Científico Escolar de Arribo. Por lo tanto el referente para los tres modelos corresponde al MCE.



## **Capítulo 4**

# **ESTRATEGIA DIDÁCTICA BASADA EN LA MODELIZACIÓN, PARA EXPLICAR EL FENÓMENO RELATIVISTA DE LA SIMULTANEIDAD**

En los tres capítulos anteriores se planteó el problema que se aborda en el presente trabajo: el diseño de una Estrategia Didáctica para transformar los modelos de los estudiantes. Posteriormente se explicitaron los referentes teóricos y metodológicos que sirven de guía para esta tarea: en primer lugar se propuso una declaración sobre lo que es un modelo en el marco de la ciencia y también se expuso lo que se entiende por modelización. Se parte de suponer que en la ciencia se conoce a la naturaleza a partir de la elaboración de modelos y, es por medio de esta visión que se buscan nuevas formas para enseñar las ciencias -física, química, biología, etc. En particular en esta aportación se adopta la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) para diseñar la Estrategia Didáctica basada en la modelización (ver sección 2.4 donde se describe la metodología seguida, a partir de dicha contribución).

## 4.1. DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA

Para detallar el diseño de la Estrategia Didáctica se retomará el cuadro 2.5 que esquematiza de forma general la ED. A partir de dicho cuadro se identifican cuatro momentos, en los cuales se elegirán distintos tipos de actividades según sea el propósito que se establezca en cada momento: Actividades de iniciación (AI); Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP); Actividades de síntesis (AS) y Actividades de aplicación (AA).

Estos cuatro momentos se distribuirán en cuatro sesiones de dos horas cada una, y las actividades que se elijan en cada etapa deberán estar fundamentadas en: las síntesis propuestas en este trabajo acerca de lo que es un modelo y la modelización - proceso donde se incluye el uso de la argumentación y la metacognición-, y en la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) acerca del diseño de ED basadas en la modelización.

La primera sesión servirá para presentar los objetivos de la ED y se buscará establecer una base común con los estudiantes para que todos estén en concordancia respecto a la forma de trabajo durante la aplicación de la ED. Se hará énfasis en lo relativo a los procesos de argumentación y metacognición. Estos dos últimos aspectos se relacionarán con la modelización desde la primera sesión para lograr su desarrollo a lo largo de toda la ED.

Se postula que es posible hacer lo anterior, ya que ellos han trabajado con modelos propios de la física y se asume que tendrán ciertas ideas sobre ellos, o al menos tendrán nociones de algunos modelos en la física. Por esta razón se discutirá con los alumnos en la primera sesión lo que es un modelo y también se les presentará la síntesis propuesta en este trabajo, la cual se expuso en la sección 2.1.1.

A continuación se describirá el desarrollo de la ED en términos de los momentos retomados a partir de la propuesta de Sanmarti (2000), y de las sesiones en las que se llevarán a cabo.

Cuadro 4.1: *Esquema general por sesiones de la Estrategia Didáctica.*

Momento de la Estrategia Didáctica	Sesión
Actividades de iniciación (AI)	1 2 (primera mitad)
Segundo momento de la ED, Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP)	2 (segunda mitad) 3 (primera mitad)
Tercer momento de la ED, Actividades de síntesis (AS)	3 (segunda mitad)
Cuarto momento de la ED, Actividades de aplicación (AA).	4 (sesión completa)

Cuadro de construcción propia.

#### 4.1.1. Primer momento de la ED, Actividades de iniciación (AI)

En el primer momento de la ED se comenzará con una actividad diseñada para trabajar aspectos actitudinales de los estudiantes y para discutir con ellos acerca de los modelos y sobre el proceso de modelización, particularmente en el uso de la metacognición y argumentación. Lo anterior tiene la finalidad de establecer un lenguaje común en el aula, que permita desarrollar la Estrategia Didáctica basada en la modelización.

Posteriormente se incluyen actividades que permitan introducir elementos que sirvan de punto de partida para abordar el fenómeno de la simultaneidad. Inicialmente se buscará que los estudiantes lo expliquen desde la mecánica clásica, debido a que se encontró en los reportes mostrados en la tabla (1.1), que los alumnos con los que se trabajó en algunos de los estudios, tienen problemas para explicar el fenómeno desde la perspectiva de la mecánica clásica. Esto se debe, en parte, a que los estudiantes no tienen claridad sobre los marcos de referencia.

Al realizar lo anterior se podrá ver el manejo que hacen los estudiantes de los sistemas de referencia, observadores y las transformaciones de Galileo. En caso de que haya un mal manejo de estos aspectos o falta de comprensión, se tendrá que proporcionar la explicación de la ciencia erudita para que los alumnos tengan claridad de lo anterior y partan de la misma base para proseguir con la explicación relativista de la simultaneidad. Cabe señalar que este primer momento se contempla para la **primera sesión** de la ED. A continuación se describirán las actividades a realizar en la primera

sesión.

## Primera sesión

En la primera sesión de la Estrategia Didáctica (con duración de dos horas) se presentarán los objetivos generales de la misma: transformar los modelos de los estudiantes, del MCA inicial al MCEA; promover procesos de metacognición y desarrollar la argumentación dentro del proceso de modelización, (**actividad A1**, cuadro 4.2).

Cuadro 4.2: *Primera sesión de la Estrategia Didáctica.*

Objetivos: transformar los modelos de los estudiantes, del MCA inicial al MCEA; promover procesos de metacognición y desarrollar la argumentación dentro del proceso de modelización.		
Actividades iniciales	Selección de contenidos	Evaluación inicial
A1: presentación de los objetivos generales de la ED (5 min.)		
A2: discutir de forma grupal sobre las estrategias que los estudiantes usan para aprender y exponer los aspectos de la metacognición y la argumentación que se desea desarrollar con ellos en el aula (60 min.)	Metacognición y argumentación	participación individual, integración a la dinámica del grupo, autorregulación, respeto, uso de la argumentación
A3: recabar ideas de los alumnos acerca de los modelos y la construcción de los mismos, esta actividad se hará por medio de un cuestionario abierto (ver anexo 1) y posteriormente se presentará la síntesis acerca de lo que es un modelo (desde el semanticismo) propuesta en la sección 2.1.1 (40 min.), posteriormente se discutirá con los alumnos sobre el proceso de modelización en relación con la argumentación y la metacognición utilizando el cuadro (2.4) y la figura (2.1).	Modelo, modelización (metacognición $\rightleftharpoons$ argumentación).	En la sección 3.4.1 se mencionó que en el laboratorio de mecánica se le enseña a los alumnos a construir modelos, por lo tanto se evaluarán las ideas que tengan acerca de ello
A4: con la finalidad de disponer de un lenguaje común en el aula, se trabajará el ejemplo que se proporcionó al final de la sección 2.1.1 (15 min.)		

Cuadro de construcción propia.

Para que en el aula exista un lenguaje común, es necesario explicar y discutir con los alumnos acerca del papel de la metacognición y la argumentación en el proceso de modelización (**actividad A2**, cuadro 4.2). Con la discusión que se genere acerca de estos aspectos se espera recabar información de las estrategias que usan los estudiantes en su aprendizaje, y ésta servirá para comparar el avance de los estudiantes en el uso de los procesos metacognitivos y de la argumentación durante la

ED y al finalizar la misma.

Para desarrollar la actividad A2 se seguirán las etapas descritas en el Anexo 2, las cuales se muestran a continuación

1. Ofrecer un texto o presentar una situación detonante, con la finalidad de que los estudiantes reflexionen acerca de algún asunto y expresen preguntas y opiniones al respecto.
2. Elaboración de la agenda, junto con los alumnos, para discutir en clase sobre el tema planteado por medio del texto. Lo anterior se puede llevar a cabo al elaborar una pregunta o idea central que se discutirá de forma colectiva por medio de la exploración de ideas, generación de hipótesis y conjeturas para explicar la situación problemática utilizando argumentos.
3. Consolidar la comunidad de indagación propiciando un clima de solidaridad, donde los integrantes comprendan lo que se discute y no se autoexcluyan por no sentirse parte de la dinámica.
4. El profesor debe promover el diálogo y la discusión a través del uso de preguntas abiertas y la introducción de ejercicios.
5. Alentar a los alumnos a responder sus preguntas y resolver sus dudas, después del proceso de indagación el grupo evaluará sus conclusiones y se terminará la deliberación (Lipman, 2003).

En la primera etapa se debe proporcionar un texto o situación detonante que se leerá individualmente en clase, con la intención de detonar una discusión acerca de las estrategias de aprendizaje que tienen los alumnos, sobre el uso de la argumentación y la metacognición, particularmente se eligen extractos del texto “No permita que el miedo a la dificultad lo paralice” del libro de Paulo Freire (1994) “Cartas a quien pretende enseñar”. A continuación se presentan los extractos del texto mencionado:

Uno de los errores más terribles que podemos cometer mientras estudiamos, como alumnos o maestros, es retroceder frente al primer obstáculo con que nos enfrentamos, no asumir la responsabilidad que nos impone la tarea de estudiar... Estudiar es un quehacer

exigente en cuyo proceso se da una sucesión de dolor y placer, de sensación de victoria, de derrota, de dudas y alegría. Pero por lo mismo estudiar implica la formación de una disciplina rigurosa que forjamos en nosotros mismos, en nuestro cuerpo consciente. Esta disciplina no puede sernos dada ni impuesta por nadie... De cualquier manera, o somos sujetos de ella, o ella se vuelve una mera yuxtaposición a nuestro ser. O nos adherimos al estudio como un deleite y lo asumimos como una necesidad y un placer o el estudio es una pura carga, y como tal, lo abandonamos en la primera esquina.

Cuanto más asumimos esta disciplina tanto más nos fortalecemos para superar algunas amenazas que la acechan y que acechan, por lo tanto, a la capacidad de estudiar eficazmente. Una de las amenazas, por ejemplo, es la concesión que nos hacemos a nosotros mismos de no consultar ningún instrumento auxiliar de trabajo como diccionarios, enciclopedias, etc... Otra amenaza al estudio serio, que se transforma en una de las formas más negativas de huir de la superación de las dificultades que enfrentamos... es la de proclamar la ilusión de que estamos entendiendo, sin poner a prueba nuestra afirmación... (y por último) otra amenaza para el cumplimiento de la tarea difícil y placentera de estudiar, que resulta de la falta de disciplina... es la tentación que nos acosa... de volar con la imaginación...

En la segunda etapa se pedirá a los estudiantes que se reúnan en pequeños grupos (dos o tres participantes) y discutan entre ellos de qué forma se puede aprender mejor, luego se les pedirá que escriban en un enunciado sus conclusiones. Posteriormente cuando todos terminen, un representante de cada grupo expondrá lo que escribieron.

Al finalizar lo anterior, el profesor presentará a los estudiantes los dos aspectos que se consideran fundamentales para la modelización en esta ED, la argumentación y la metacognición (resumidos en los cuadros 2.3 y 2.2 respectivamente). Luego se retomarán las respuestas de los alumnos para hacer una discusión general acerca de las formas más útiles para potenciar su aprendizaje, o construcción de conocimiento.

En este proceso el docente debe consolidar la dinámica de participación en el grupo al propiciar un ambiente de solidaridad entre los propios estudiantes y facilitando la participación del mayor

número de personas, cuidando que un solo participante (incluido el docente) no monopolice las intervenciones, evitar las reiteraciones, controlando el tiempo de cada aportación, además de promover el diálogo y la discusión por medio de preguntas abiertas. Estos aspectos se deben comunicar al grupo para que todos sean conscientes de la dinámica, que finalmente mejorará el trabajo en el aula.

Después de la discusión del texto, junto con la exposición sobre el uso de la metacognición y la argumentación dentro del proceso de aprendizaje de los alumnos, se buscará relacionarlo con la visión semanticista de la ciencia que se adopta en este trabajo, es decir con la construcción de modelos.

Se considera necesario discutir con los estudiantes el papel de los modelos en el conocimiento científico (**actividad A3**, cuadro 4.2). Lo anterior tiene la finalidad de recabar información sobre las ideas de los alumnos acerca de los modelos, ya que se espera que para el cuarto semestre de la Licenciatura en Física ya están familiarizados con el uso de modelos en física. La obtención de ideas de los alumnos, en esta actividad, se hará primero mediante un cuestionario abierto (ver el anexo 1) y posteriormente con una discusión grupal guiada por la metodología expuesta en los Anexos 2 y 3.

Al final de la discusión se les propondrá la concepción de modelo propuesta en la sección 2.1.1, enfatizando que esta tiene una utilidad práctica más que ser una definición rigurosa, que permita reflexionar sobre el uso de los modelos.

Para finalizar la primera sesión se presentará el ejemplo del modelo que se mostró en la sección 2.1.1, donde se explica el fenómeno de la caída de una piedra, desde una altura dada, y como recapitulación se les mostrará el cuadro (2.4), donde se muestra la interrelación de las concepciones de modelo y modelización con la metacognición y la argumentación.

## **Segunda sesión (primera mitad)**

La segunda sesión se dividirá en dos partes. En la primera de ellas se proponen dos actividades (B1, B2) que corresponden al primer momento de la Estrategia Didáctica, donde habrán actividades de iniciación que permitan a los estudiantes identificar el fenómeno inicial y al docente conocer

sus modelos iniciales. Posteriormente, en la segunda mitad se llevará a cabo una actividad (B3) que forma parte del segundo momento de la estrategia didáctica, la cual tiene la finalidad de que los estudiantes cambien sus modelos iniciales.

En la actividad B1 se comunican nuevamente los objetivos generales de la ED con la intención de clarificar las dudas que surjan al respecto. Más adelante, en la actividad B2 se presentará el fenómeno de la simultaneidad, enmarcado en el diseño experimental que se expuso en la sección 3.2.1. En esta segunda actividad se pedirá a los alumnos que expliquen el fenómeno de simultaneidad desde el marco de la mecánica clásica. Lo anterior se realizará por medio de una discusión grupal, para propiciar que los estudiantes expliciten sus ideas acerca de los sistemas de referencia, observadores y las transformaciones de Galileo (denotación). En la tercera actividad (B3) se busca establecer la incompatibilidad que existe entre la explicación del fenómeno de la simultaneidad desde la mecánica clásica con la explicación que se construye desde la Teoría de la Relatividad Especial.

#### **4.1.2. Segundo momento de la ED, Actividades para promover que los estudiantes cambien sus modelos iniciales (AP)**

En el segundo momento de la ED se realizarán actividades para promover que los alumnos transiten en la construcción de sus modelos iniciales a otros cada vez más cercanos a los de la ciencia experta. Estas actividades tendrán lugar en dos sesiones diferentes. Las primeras de estas actividades se realizarán en la segunda mitad de la sesión dos, y se continuará con ellas en la primera parte de la tercera sesión de la ED.

#### **Segunda sesión (segunda mitad)**

Se debe recordar que la sesión dos se conforma de tres actividades (B1, B2 y B3). Las dos primeras corresponden al primer momento de la Estrategia Didáctica y la actividad B3 al segundo momento de ella.

En la actividad B3, se busca hacer patente la incompatibilidad entre las leyes del electromagne-



tismo con las transformaciones de Galileo (denotación, demostración e interpretación), con esto se busca plantear junto con los estudiantes, que las transformaciones de Galileo no son adecuadas para describir los fenómenos electromagnéticos entre distintos marcos de referencia .

Para poder lograr lo anterior es necesario discutir con los alumnos lo expuesto en la secciones "Sistemas de referencia privilegiados", "Ondas electromagnéticas y el éter", y "Ondas electromagnéticas bajo las transformaciones de Galileo" (3.1.1.3, 3.1.1.4 y 3.1.1.5) (denotación).

Posteriormente se buscará que los estudiantes reflexionen sobre el primer postulado de la TRE expuesto en la sección 3.1.2.2, con el cual se enuncia que las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales y por tanto, las observaciones que se hagan en un sistema de referencia serán equivalentes a las que se hagan en algún otro. Dicha equivalencia se obtiene con las reglas de transformación, que en el caso de la mecánica clásica son las transformaciones de Galileo. Se hará énfasis a los estudiantes sobre el hecho de que es por medio de ellas que es posible obtener unas conclusiones sobre el fenómeno (demostración e interpretación). Además, con la revisión de las secciones (3.1.1.3, 3.1.1.4 y 3.1.1.5) deberá quedar clara la necesidad de construir otro tipo de explicación que permita conciliar el comportamiento de las ondas electromagnéticas (luz) en distintos sistemas de referencia inerciales.

Cuadro 4.3: Segunda sesión de la Estrategia Didáctica.

Objetivos: transformar los modelos de los estudiantes, del MCA inicial al MCEA; promover procesos de metacognición y desarrollar la argumentación dentro del proceso de modelización.				
Actividades iniciales		Selección de contenidos	Evaluación inicial	Modelización
B1: comunicar nuevamente los objetivos generales de la ED y atender las dudas que puedan surgir sobre ellos (10 min.).				
B2 50 min	Antecedentes y presentación del fenómeno paradigmático dentro de la situación experimental expuesta en la sección 3.2.1. Se hará un análisis del fenómeno de simultaneidad desde el marco de la mecánica clásica. Esta actividad se desarrollará como una discusión grupal.	Sistemas de referencia inerciales. Observadores y eventos (lo anterior forma parte de las entidades del modelo).	Evaluar las ideas de los estudiantes acerca de los sistemas de referencia, observadores y transformaciones de Galileo. En esta etapa se evaluará el modelo que construyan en el marco de la mecánica clásica.	MCA inicial. Denotación: entidades, sus propiedades y relaciones
	Por medio de las transformaciones de Galileo se pedirá a los estudiantes que describan el fenómeno que se les presentó al inicio de la sesión.	Transformaciones de Galileo.		Demostración: con las transformaciones de Galileo los alumnos explicarán el fenómeno.
B3 60 min	Se buscará poner de manifiesto la incompatibilidad entre la mecánica clásica (transformaciones de Galileo) con las observaciones acerca de la velocidad de la luz (secciones 3.1.1.3 a 3.1.1.5) mediante la exposición por parte del profesor.	Luz. Medio de propagación como sistema privilegiado,	La cuestión central a evaluar será la detección de la incompatibilidad entre las predicciones de la mecánica clásica en relación a la velocidad de la luz, con las leyes del electromagnetismo. También se deberá evaluar si los estudiantes afianzan el primer postulado de la TRE.	MCA intermedio. Denotación: en esta esta sesión se analizarán las propiedades de los sistemas de referencia. Demostración: se pondrá de manifiesto la incompatibilidad entre la mecánica clásica y la TRE.
	Se propiciará la discusión en el grupo y se conducirá ésta para que los estudiantes reflexionen acerca del principio de relatividad (sección 3.1.1.2) y sobre el primer postulado de la TRE (sección 3.1.2.2).	Principio de relatividad. Primer postulado de la TRE.		Interpretación: una vez que las inconsistencias entre ambas teorías quede clara se podrá ver la necesidad de construir otro modelo, con la TRE.

Cuadro de construcción propia.

**Descripción de las actividades de la sesión** Con la intención de hacer explícito el desarrollo de las actividades en la sesión, se extenderá la descripción de las actividades B2 y B3.

En la actividad B2 se presentará el fenómeno de la relatividad, dentro de la situación experimen-

tal expuesta en la sección 3.2.1 y se pedirá a los alumnos que por medio de una discusión grupal expliquen la simultaneidad de dos haces de luz que viajan en las dos trayectorias descritas en la sección 3.2.1. Un primer haz viajará del espejo  $A$  al espejo  $D$ , evento  $d'$ , y el otro haz recorrerá la trayectoria que va del espejo  $A$  al espejo  $B$ , evento  $b$ , (ver figura 3.2).. La explicación deberá estar dentro del marco de la mecánica clásica, es decir, utilizando las transformaciones de Galileo. Para poder desarrollar la discusión grupal, en esta actividad, se seguirá la siguiente secuencia de preguntas:

- En el fenómeno expuesto ¿cuáles son las entidades que intervienen?
- ¿Cuáles son las propiedades de estas entidades?
- Explícite las relaciones entre las entidades mencionadas.

Una vez que los alumnos aporten ideas sobre y se llegue a un consenso para responder las preguntas, se procederá a analizar el fenómeno y para ello se enunciarán las preguntas siguientes.

Para un observador  $o^1$ , situado en el sistema de referencia en movimiento,  $S^1$ :

- ¿Qué tiempo tarda un haz de luz en ir del espejo  $A$  al espejo  $B$  y cómo es ese intervalo con respecto al de otro haz que viaje del espejo  $A$  al espejo  $D$ .
- Si los dos haces salen del espejo  $A$  al mismo tiempo ¿uno llegará (al espejo  $B$  o  $D$ ) con algún retraso, respecto al otro haz?
- Cómo es la distancia del espejo  $A$  al  $B$ , respecto a la distancia del espejo  $A$  al  $D$ .
- Responda las preguntas anteriores, pero esta vez hágalo según lo haría un observador  $o$ , en un sistema de referencia de referencia en reposo  $S$ , que observa el arreglo experimental desplazarse, dentro del otro sistema de referencia en movimiento  $S^1$ .

Una vez que los estudiantes discutieron las preguntas anteriores, se buscará establecer explícitamente la incompatibilidad que existe entre la explicación del fenómeno de simultaneidad (actividad B3) hecha con la mecánica clásica (usando las transformaciones de Galileo), y entre las leyes del

electromagnetismo. Para lograr lo anterior el profesor expondrá a los alumnos las secciones "Sistemas de referencia privilegiados", "Ondas electromagnéticas y el éter", y "Ondas electromagnéticas bajo las transformaciones de Galileo" (3.1.1.3 a 3.1.1.5).

Con ayuda de la primera sección, 3.1.1.3, el profesor discutirá rápidamente dos fenómenos en los que existe un sistema de referencia privilegiado, la propagación de ondas mecánicas por un material elástico y el movimiento de un cuerpo a través de un fluido. En ambos casos los sistemas de referencia son privilegiados ya que la descripción de los dos fenómenos se hace en términos del medio donde se presentan dichos fenómenos. A partir de la siguiente sección, 3.1.1.4, se expondrá como se quiso trasladar el uso de un medio privilegiado para describir la propagación de la luz, ya que al ser un fenómeno ondulatorio (ondas electromagnéticas) se pensó en la necesidad un medio de propagación, al igual que las ondas mecánicas. A dicho medio se le denominó "éter" y se utilizó como hipótesis para hacer mediciones de la velocidad de la luz. Las evidencias experimentales permitieron determinar que el éter no existía y además fue posible saber que la luz tiene la misma velocidad; sin importar el estado de movimiento del sistema desde el que se mida, es decir, que es invariante. Por último con lo expuesto en la sección 3.1.1.5, el docente guiará el análisis de como cambia una onda electromagnética al aplicarle las transformaciones de Galileo. Así se puede notar que las ondas tienen velocidades diferentes según un observador que se mueva en el mismo sentido de propagación de la onda o en sentido contrario, lo cual está en contradicción con lo que se discutió acerca de las mediciones de la velocidad de la luz en la sección "Ondas electromagnéticas y el éter".

Por último, para terminar la segunda sesión se propiciará una discusión grupal para que los estudiantes reflexionen acerca del principio de relatividad (sección 3.1.1.2), que establece que las leyes de la física son iguales para todo sistema inercial, y sobre el primer postulado de la TRE (sección 3.1.2.2); el cual en esencia es el mismo que el anterior, salvo que establece que no existen sistemas de referencia privilegiados. Lo anterior tiene la finalidad de clarificar que los fenómenos naturales se comportarán bajo las mismas leyes, sin importar el sistema de referencia desde el cual se observen.

**La modelización en la segunda sesión.** En el cuadro (4.3) se muestran los modelos que se considerarán en cada actividad (MCA inicial para la actividad B2 y MCA intermedio para la actividad B3), además se indican las etapas de la modelización a las cuales se les dará mayor énfasis en cada actividad.

En la actividad B2, se espera que los estudiantes expresen su MCA inicial, para el fenómeno de simultaneidad. Dicho modelo estará en la lógica de la mecánica clásica. En esta sesión se evaluará la detección de las entidades del modelo, las propiedades de éstas (ver cuadros 3.2 y 3.3), sus relaciones, condiciones y las reglas de inferencia (ver secciones 3.4.2 y 3.5). La identificación de lo anterior se realiza durante el proceso de modelización (ver cuadro 2.1), y como se mencionó antes, en esta segunda sesión se considerará en mayor medida la presencia de la denotación y la demostración (actividades B2 y B3), mientras la etapa de interpretación se considerará durante la actividad B3 (ver cuadro 4.3).

En esta segunda sesión se deberá recordar con los estudiantes, que durante la modelización (denotación, demostración e interpretación) están presentes la metacognición y la argumentación (ver cuadro 2.4), los cuales se deberán fomentar y registrar para su evaluación, lo cual se hará con la adaptación del cuadro (2.4) para la segunda sesión de la Estrategia Didáctica, donde se especifican las categorías de análisis que permitirán analizar los datos que se recaben. Para ello se deberá hacer uso del cuadro (4.4).

Cuadro 4.4: Modelización en la segunda sesión.

Modelización		
<b>(M) Autorregulación, planificación de estrategias, administración del tiempo, automonitoreo, motivación y (M,A) autorreflexión.</b>		
<b>(M) Determinación de los objetivos, formulación de preguntas, activación del conocimiento previo,</b>		
Denotación	Demostración	Interpretación
entidades, propiedades, relaciones	reglas de inferencia	reglas de inferencia, afirmaciones sobre el fenómeno
<p>Actividad sesión 2.  <b>B2: MCA inicial.</b>  <u>Se espera que las propiedades de las entidades y las relaciones estén en el marco de la mecánica clásica.</u>  <b>B3: MCA intermedio.</b>  <u>Se analizarán las propiedades de los sistemas de referencia</u></p>	<p>Actividad sesión 2.  <b>B2: MCA inicial.</b>  <u>Con las transformaciones de Galileo los alumnos explicarán el fenómeno</u>  <b>B3: MCA intermedio.</b>  <u>Se pondrá de manifiesto la incompatibilidad entre la mecánica clásica y la TRE</u></p>	<p>Actividad sesión 2.  <b>B3: MCA intermedio.</b>  <u>Una vez que las inconsistencias entre ambas teorías quede clara se podrá ver la necesidad de construir otro modelo, con la TRE</u></p>
<p><b>(M) Activación del conocimiento previo</b></p> <p><b>(M) Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes: <u>las fuentes de información serán los conocimientos previos que puedan aportar en el grupo, por medio de la discusión y la guía del profesor determinarán si son consistentes con la ciencia experta</u></b></p> <p><b>(M) Elaboración y prueba de hipótesis: <u>las hipótesis girarán en torno al fenómeno de simultaneidad y la prueba se hará a partir de las reglas de inferencia</u></b></p>	<p><b>(M) Construcción y confrontación de argumentos: <u>los argumentos se expondrán en la clase y se promoverá la discusión entre los estudiantes para que los confronten</u></b></p> <p><b>(M, A) Representación y manejo de los datos obtenidos: <u>las representaciones podrán ser gráficas, con esquemas o matemáticas. Los datos a manejar son las longitudes, la velocidad relativa de los sistemas de referencia y de la luz.</u></b></p> <p><b>(M, A) Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas y (A) respaldo para apoyar ciertas justificaciones: <u>se obtendrán a partir de las reglas de inferencia</u></b></p>	<p><b>(M) Generalización de los resultados: <u>sobre los sistemas de referencia, el principio de relatividad (primer postulado de la TRE)</u></b></p> <p><b>(A) Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones: <u>en relación a la inexistencia de los sistemas de referencia absolutos.</u></b></p> <p><b>(A) Comparen sus ideas con posturas alternativas: <u>el marco de la mecánica clásica contra el marco de la TRE</u></b></p> <p><b>(A) Explicación: <u>sobre sistemas de referencia inerciales, la inexistencia de marcos de referencia absolutos y su relación con la inconsistencia entre la mecánica clásica y la TRE</u></b></p>
<p><b>Condiciones, afirmaciones sobre el fenómeno, hipótesis teóricas.</b></p> <p><b>(A) Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera: <u>marcos de referencia inerciales, absolutos (estos últimos en el contexto de la mecánica clásica), y el uso de estos últimos para tratar de explicar la inconsistencia entre la mecánica clásica y el electromagnetismo en relación a la velocidad de la luz</u></b></p> <p><b>(A) Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple: <u>el experimento de Michelson Morley con el que se explica que la velocidad de la luz no varía según el estado de movimiento de la fuente que la emita</u></b></p>		

Cuadro de construcción propia.

### Tercera sesión (primera parte)

Recordemos que en la etapa dos de la Estrategia Didáctica (ver cuadro 2.5) se tiene la finalidad de promover el cambio de los modelos iniciales de los estudiantes, para lo cual es necesario aportar

elementos que hagan patentes las inconsistencias de sus modelos con el de la ciencia erudita. Por esta razón, en la **primera parte de la tercera sesión** de la ED se abordará el segundo postulado de la TRE, es decir que la velocidad de la luz en el vacío es invariante para todos los sistemas de referencia (sección sección 3.1.2.2).

Con la intención de que los estudiantes mejoren sus modelos, se presentarán los dos postulados de la TRE y se deducirán las transformaciones de Lorentz junto con las sus consecuencias (ver secciones 3.1.2.3 y 3.1.2.4). Luego se pedirá que apliquen dichas transformaciones de forma cualitativa y cuantitativa a la situación elegida que se presentó desde la segunda sesión, lo que se pedirá que realicen por escrito.

En la primera actividad de la tercera sesión (C1, cuadro 4.5) se recapitularán los objetivos generales de la ED y se pedirá a los alumnos que autoevalúen su avance sobre el manejo de la metacognición y la argumentación en la Estrategia Didáctica, junto con el proceso de modelización. Lo anterior tiene la finalidad de promover los procesos de metacognición en los estudiantes.

Con la actividad C2 (cuadro 4.5) se discutirá en el grupo sobre las posibilidades para sortear las inconsistencias planteadas en la actividad B3 de la sesión anterior (cuadro 4.3). En este sentido se presentará a los alumnos la propuesta de suponer que la velocidad de la luz en el vacío es invariante para todos los sistemas de referencia (segundo postulado de la TRE, sección sección 3.1.2.2), que junto al primer postulado de la TRE, presentado en la actividad B3 de la sesión anterior, hacen posible la deducción de las transformaciones de Lorentz, las cuales expondrá el docente en el salón de clases fomentando la participación del grupo.

En la siguiente actividad, C3, se analizan las consecuencias de dichas transformaciones dentro de la situación experimental seleccionada (ver las secciones 3.1.2.4 y 3.3), particularmente sobre la dilatación del tiempo y la contracción de las longitudes, los alumnos realizarán lo anterior primero de forma cualitativa para determinar la estrategia que posteriormente emplearán formalmente en el análisis del fenómeno. El trabajo en la actividad C3 será en pequeños grupos (aproximadamente 3 estudiantes) y se pedirá que plasmen por escrito sus conclusiones, las cuales servirán de evidencia para poder evaluar la evolución de sus modelos.

En la siguiente actividad, C4, se pedirá a los alumnos que se centren en los eventos  $b$  y  $d'$  (ver la sección 3.3.1) para que ellos expliquen el fenómeno de simultaneidad. De igual modo esta actividad se realizará en pequeños grupos y se pedirá a los estudiantes que escriban las conclusiones a las que llegan después de aplicar las transformaciones de Lorentz cuando analicen dichos eventos.

Al igual que se hizo para la sesión anterior, se establecerá la secuenciación que se seguirá para dirigir cada una de las actividades que se realizarán.

Actividad C2:

1. Se retomará el resultado de la sección 3.1.1.5, donde se obtiene que la velocidad de la luz depende del estado de movimiento de la fuente o del observador que la registra, si se aplican las transformaciones de Galileo.
2. Posteriormente se presentará a los estudiantes el segundo postulado de la TRE (ver sección 3.1.2.2 y se recordará el primer postulado visto en la sesión anterior.
3. A partir de ambos postulados es posible deducir las nuevas transformaciones, de Lorentz (sección 3.1.2.3), que sustituirán a las de Galileo. La deducción la hará el profesor con la participación de los alumnos.

Actividad C3:

1. Se pedirá a los estudiantes que apliquen, de forma cualitativa, las transformaciones de Lorentz a la situación experimental que se les presentó al inicio de la ED (ver sección 3.3). Para esta actividad se contempla que el trabajo sea en grupos de dos o tres integrantes y se darán las instrucciones a todos para que posteriormente discutan en equipos.
2. Analicen de forma cualitativa lo que sucederá al aplicar las transformaciones para determinar la longitud de los segmentos y el tiempo en que recorren los haces de los eventos  $b$  y  $d'$ , según un observador situado en el sistema de referencia en movimiento  $S^1$ .
3. De forma similar al punto anterior, los estudiantes analizarán la longitud de los segmentos y el tiempo de recorrido de los haces de luz, tal como lo haría un observador situado en el sistema



de referencia en reposo  $S$ .

Actividad C4:

1. Los estudiantes, una vez terminada la discusión cualitativa, aplicarán las transformaciones de Lorentz de forma cuantitativa, utilizando las ecuaciones 3.21 y 3.22.
2. Los alumnos determinarán las longitudes y tiempos de los recorridos de los dos haces (eventos  $b$  y  $d'$ ) desde el sistema de referencia en movimiento  $S^1$ .
3. Además determinarán las longitudes y tiempos de los recorridos de los dos haces (eventos  $b$  y  $d'$ ) desde el sistema de referencia en reposo  $S$ .

#### 4.1.3. Tercer momento de la ED, Actividades de síntesis (AS)

Durante el tercer momento se desarrollará la actividad de síntesis, lo cual se llevará a cabo al finalizar la tercera sesión. El objeto de esta actividad es que los estudiantes sinteticen lo que han aprendido en las sesiones anteriores y construyan su modelo de la simultaneidad en términos de la TRE.

Los alumnos al aplicar las transformaciones de Lorentz para explicar el fenómeno de la simultaneidad, dentro de la situación experimental propuesta, elaborarán el Modelo Científico Escolar de Arriba y se espera que al finalizar la tercera sesión se tengan las evidencias del MCEA para su análisis.

#### Tercera sesión (segunda parte)

Con la finalidad de concretar el modelo de arriba de los alumnos, en la actividad C5 se pedirá que de forma grupal se construya el modelo del fenómeno de simultaneidad mediante una discusión donde la argumentación sea un elemento central para su construcción. El modelo que se logre en dicha discusión será considerado como el Modelo Científico Escolar de Arriba, por lo cual deberá registrarse tanto el proceso de discusión como de negociación de ideas en clase. De igual forma se

registrará el uso de argumentos utilizados por los estudiantes para eliminar las inconsistencias del modelo y la construcción final será registrada para su posterior análisis.

Cuadro 4.5: Tercera sesión de la Estrategia Didáctica.

Actividades para promover la evolución de los modelos iniciales	Nuevos elementos.	Evaluación durante la ED	Modelización
C1: recapitulación de los objetivos generales de la ED con los estudiantes y se les pedirá que autoevalúen su desempeño en el proceso de la ED y lo expresen individualmente por escrito (10 min.)			
C2: a partir de B3, se discutirán posibilidades para sortear las inconsistencias ahí planteadas. Se conducirá la discusión para que se analice el segundo postulado de la TRE (ver sección 3.1.2.2) y las consecuencias de la invarianza de la luz en el vacío (deducción de las transformaciones de Lorentz, sección 3.1.2.3) (30 min)	Sistemas de referencia inerciales, observadores, luz (segundo postulado). Transformaciones de Lorentz	Se evaluará si los estudiantes asimilan el segundo postulado de la TRE y las transformaciones de Lorentz como consecuencia de él	MCA intermedio. Denotación, Demostración, Interpretación
C3: los estudiantes aplicarán las transformaciones de Lorentz a la situación experimental, primero de forma cualitativa, para determinar la estrategia que posteriormente emplearán formalmente. El trabajo en esta actividad será en pequeños grupos (10 min)	Dilatación del tiempo, contracción de las longitudes	Evaluar si los estudiantes reconocen que la contracción de las longitudes sólo se observa en la dirección de movimiento y su explicación de la dilatación del tiempo	MCA intermedio. Denotación, Demostración, Interpretación
C4: Para la aplicación formal se hará énfasis en los eventos $b$ y $d'$ (ver la sección 3.3) con la finalidad de que los alumnos expliquen el fenómeno de simultaneidad en pequeños grupos utilizando las ecuaciones 3.21 y 3.22 (35 min)	Simultaneidad	Se evaluará el MCA intermedio de los alumnos sobre la simultaneidad	MCA intermedio. Denotación, Demostración, Interpretación
C5: de forma grupal se expresará el MCEA del fenómeno de simultaneidad. La construcción que se logre servirá de evidencia. Al concluir lo anterior se expondrá la definición general que se dio del fenómeno de simultaneidad en la parte inicial de la sección 3.1. y se discutirá a modo de síntesis para remarcar que éste fenómeno no es exclusivo de la situación que se les presentó (35 min)	Simultaneidad	Evaluación del MCEA que se construya grupalmente	MCEA Denotación, Demostración, Interpretación

Cuadro de construcción propia.

la secuenciación que se seguirá para dirigir la actividad C5, se muestra a continuación.

Actividad C5:

1. Para finalizar se hará una discusión grupal con la intención de que los estudiantes expresen el modelo que construyeron. La discusión comenzará con la exposición de los resultados que obtenga cada equipo en la actividad anterior.

2. Se anotarán sus respuestas en el pizarrón para que todos puedan ver los resultados de los demás y una vez concluido esto se procederá a la discusión grupal. Se preguntará si están de acuerdo con alguna respuesta de otro equipo, con la suya o bien que digan cual consideran que está mal y argumenten por qué.
  
3. Con este proceso se podrá construir una respuesta grupal que esté en concordancia con la explicación que se hace según el Modelo Científico Experto (MCE). Esta construcción final será el MCEA de los estudiantes y se registraran las conclusiones.
  
4. Después de lo anterior se expondrá la definición general del fenómeno de simultaneidad que se dio en la sección 3.1, a modo de síntesis y se hará énfasis en el hecho de que éste fenómeno no es exclusivo de la situación que se les presentó.

**La modelización en la tercera sesión.** En la tercera sesión de la ED, es donde se desarrollará de forma más articulada el proceso de modelización, debido a que se espera que los estudiantes construyan gradualmente el modelo del fenómeno de simultaneidad, desde el marco de la Teoría de la Relatividad Especial (actividades C2 a C5). A continuación, en el cuadro 4.6, se muestra una adaptación del cuadro (2.4) para especificar como se trabajarán los aspectos de la metacognición y la argumentación durante el proceso de modelización que se trabajará con los estudiantes durante la tercera sesión de la Estrategia Didáctica.

Cuadro 4.6: Modelización en la tercera sesión.

Modelización		
<b>(M) Autorregulación, planificación de estrategias, administración del tiempo, automonitoreo, motivación y (M,A) autorreflexión.</b>		
<b>(M) Determinación de los objetivos, formulación de preguntas, activación del conocimiento previo,</b>		
Denotación	Demostración	Interpretación
entidades, propiedades, relaciones	reglas de inferencia	reglas de inferencia, afirmaciones sobre el fenómeno
Actividad sesión tres. <u>C2, C3, C4: MCA intermedio</u> <u>C5: MCEA</u>	Actividad sesión tres. <u>C2, C3, C4: MCA intermedio</u> <u>C5: MCEA</u>	Actividad sesión tres. <u>C2, C3, C4: MCA intermedio</u> <u>C5: MCEA</u>
<p><b>(M) Activación del conocimiento previo</b></p> <p><b>(M) Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes:</b> <u>Experimento de Michelson_Morley y los postulados de la TRE</u></p> <p><b>(M) Elaboración y prueba de hipótesis:</b> <u>la simultaneidad a partir de los postulados de la TRE y su prueba con las transformaciones de Lorentz</u></p>	<p><b>(M) Construcción y confrontación de argumentos:</b> <u>para determinar la simultaneidad de los eventos b y d' según el observador situado en el sistema de referencia S o S'</u></p> <p><b>(M, A) Representación y manejo de los datos obtenidos:</b> <u>a partir de los postulados de la TRE se obtienen las transformaciones de Lorentz, las cuales se deberán manejar para deducir las consecuencias de la TRE</u></p> <p><b>(M, A) Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas y (A) respaldo para apoyar ciertas justificaciones:</b> <u>La interrelación que hay entre la contracción de las longitudes y la dilatación del tiempo con el fenómeno de la simultaneidad</u></p>	<p><b>(M) Generalización de los resultados:</b> <u>generalizar la definición de simultaneidad para situaciones diferentes a la propuesta para esta ED</u></p> <p><b>(A) Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones:</b> <u>mediante los postulados de la TRE y las transformaciones de Lorentz se obtendrán las justificaciones para obtener las afirmaciones sobre la simultaneidad.</u></p> <p><b>(A) Comparen sus ideas con posturas alternativas:</b> <u>la visión clásica con la relativista para explicar el fenómeno de la simultaneidad</u></p> <p><b>(A) Explicación:</b> <u>sobre el fenómeno de simultaneidad y los fenómenos relativistas</u></p>
<p><b>Condiciones, afirmaciones sobre el fenómeno, hipótesis teóricas.</b></p> <p><b>(A) Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera:</b> <u>marcos de referencia inerciales, los postulados de la TRE, los efectos relativistas serán más evidentes conforme la velocidad de los objetos sea más similar a la velocidad de la luz</u></p> <p><b>(A) Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple:</b> <u>la condición con la que no se cumplen las afirmaciones de la TRE es cuando los sistemas de referencia no son inerciales</u></p>		

Cuadro de construcción propia.

#### 4.1.4. Cuarto momento de la ED, Actividades de aplicación (AA).

Por último en el cuarto momento de la ED, se propondrán una serie de actividades para que los estudiantes puedan aplicar su conocimiento a una situación nueva, a partir de considerar una nueva situación experimental, que es resultado de hacer una variación a la situación con la que se inicia la ED. Con ello se desea evaluar la construcción de los estudiantes de un nuevo modelo, tomando como base el modelo que construyan para explicar el fenómeno de la simultaneidad, para esto deberán recurrir a procesos metacognitivos, ya que deberán activar su conocimiento previo, hacer hipótesis, reflexionar, usar argumentos y hacer generalizaciones a partir de la situación anterior. La nueva situación también sirve para plantear los límites de aplicación de la TRE, y propicia dejar abierto el proceso de aprendizaje, además que refuerza la visión de que el conocimiento científico no está acabado. A continuación se presentará el desarrollo de la cuarta sesión.

### Cuarta sesión

Al inicio de la última sesión se pedirá a los estudiantes que evalúen su evolución respecto a los objetivos generales de la ED planteados desde el inicio, con la intención de promover los procesos metacognitivos (D1, cuadro 4.7). Posteriormente se explicará a los alumnos el propósito de la siguiente actividad (D2), en la cual se les presentará una situación nueva a los alumnos (actividad D3, cuadro 4.7) para evaluar su respuesta ante una nueva situación, la cual es una variación de la situación expuesta en la sección 3.2.1.

La variación radica en considerar el arreglo experimental (fuente de luz, espejos, detector) situado en un sistema de referencia en reposo, en donde se supondrá que el arreglo estará dispuesto sobre una base que puede rotar. Se pedirá a los alumnos que predigan lo que sucederá al hacer girar la base en el sentido de las manecillas del reloj y mediante el uso de argumentos construyan, entre todos, el modelo del nuevo fenómeno (actividad D4, cuadro 4.7).

Con este nuevo fenómeno se espera que los estudiantes detecten que la TRE se limita a describir fenómenos observados desde sistemas de referencia inerciales, ya que al girar la base del arreglo,

el experimento deja de estar en un sistema de referencia inercial (actividad D5, cuadro 4.7). Esta nueva situación servirá para determinar los límites de aplicación de la TRE, la cual tiene sentido en sistemas de referencia inerciales; mientras que la Teoría General de la Relatividad abarca situaciones dentro de sistemas de referencia no inerciales.

Cuadro 4.7: Cuarta sesión de la Estrategia Didáctica.

Objetivos: transformar los modelos de los estudiantes, del MCA inicial al MCEA; promover procesos de metacognición y desarrollar la argumentación dentro del proceso de modelización.			
Actividades de aplicación	Situaciones nuevas	Evaluación de comprobación	Modelización
D1: se discutirán los objetivos y se pedirá a los estudiantes que evalúen la evolución de sus modelos durante la ED (5 min.)			
D2: exponer a los alumnos el propósito de la siguiente actividad: evaluar su respuesta ante una situación nueva, utilizando los antecedentes previos (5 min.)			
D3: Presentación de la nueva situación que sirva para aplicar su conocimiento, la cual se limita al considerar el arreglo experimental (fuente de luz, espejos y detector) presentado en la sección 3.2.1 en un sistema de referencia en reposo. La variación consiste en que el arreglo se hace rotar en sentido de las manecillas del reloj (15 min.)			
D4: Discusión grupal del fenómeno (50 min.)	En la nueva situación es fundamental distinguir que al rotar el arreglo, éste ya no se encuentra en un sistema de referencia inercial	Evaluar si los estudiantes reconocen que el arreglo en rotación no está ubicado en un sistema de referencia inercial, y el modelo que construyen los estudiantes ante la situación nueva	MCA ante el cambio de la situación, Modelo Científico Experto del fenómeno
D5: Discusión de las limitaciones de la TRE, en específico que dicha teoría se limita a sistema de referencia inerciales. A partir de la discusión se expondrá a grandes rasgos la Teoría General de la Relatividad que explica los casos donde los sistemas de referencia pueden ser no inerciales (45 min). Modelo Científico Experto del fenómeno			

Cuadro de construcción propia.

A continuación se describe la secuenciación que se habrá de realizar para cada una de las actividades a efectuar en esta última sesión.

Actividad D3:

1. Se expondrá la nueva situación descrita en la sección 4.1.5. Nueva situación, para la actividad de aplicación.
2. Se aclararán las dudas que puedan tener los estudiantes sobre el nuevo arreglo experimental, sin entrar a detalle en la explicación del fenómeno.

## Actividad D4:

Para conducir la discusión grupal se tomarán de guía las siguientes preguntas:

1. En esta nueva situación se tiene un circuito circular, el cual lo recorren dos haces, uno en sentido de las manecillas del reloj y otro en sentido contrario. Suponemos que la fuente de luz está inicialmente apagada y la base del experimento rota con una velocidad angular  $\Omega$ . En un instante se prende la fuente de modo que haya un haz viajando en el sentido del giro de la base y otro haz viajará en sentido contrario. ¿Los dos haces regresarán a la fuente de luz al mismo tiempo? Suponga que donde está la fuente de luz, hay también un detector que permite saber el momento en que llega cada rayo de luz.
2. ¿Cómo será la velocidad de los dos haces de luz, tanto del que viaja en la dirección de giro de la mesa como del que viaja en sentido contrario.

Las respuestas e hipótesis de los alumnos se registrarán en el pizarrón.

## Actividad D5:

La discusión final para la nueva situación se conducirá de modo que los estudiantes identifiquen que en este caso se deben considerar sistemas de referencia no inerciales, debido a que la base en la que está el experimento gira y por lo tanto está acelerada. Se debe encaminar a los estudiantes para que recuerden que la Teoría de la Relatividad Especial está limitada a considerar el uso de sistemas de referencia inerciales. Con esta distinción se da pie para presentar la Teoría de la Relatividad General en la cual es posible considerar sistemas de referencia no inerciales.

En esta última actividad, el profesor deberá exponer la teoría que explica la nueva situación para que los estudiantes evalúen el modelo que construyeron juntos en la clase y de este modo evalúen el resultado al que llegaron ellos con el Modelo Científico Experto de la nueva situación, que se expondrá en la siguiente sección.

**La modelización en la cuarta sesión.** En la cuarta sesión se espera que los estudiantes apliquen lo que se desarrolle con ellos en la ED (modelización, argumentación y metacognición) para construir

un modelo que permita representar y explicar la nueva situación. A continuación, en el cuadro 4.8, se muestra una adaptación del cuadro (2.4) para especificar como se trabajarán los aspectos de la metacognición y la argumentación durante el proceso de modelización en la cuarta sesión de la ED.

Cuadro 4.8: Modelización en la cuarta sesión.

Modelización		
<b>(M) Autorregulación, planificación de estrategias, administración del tiempo, automonitoreo, motivación y (M,A) autorreflexión.</b>		
<b>(M) Determinación de los objetivos, formulación de preguntas, activación del conocimiento previo,</b>		
Denotación	Demostración	Interpretación
entidades, propiedades, relaciones	reglas de inferencia	reglas de inferencia, afirmaciones sobre el fenómeno
Actividad sesión tres. <u>D3: MCA inicial</u>	Actividad sesión tres. <u>D4, D5: MCA intermedio, MCE</u>	Actividad sesión tres. <u>D4, D5: MCA intermedio, MCE</u>
<p><b>(M) Activación del conocimiento previo:</b> <u>Postulados de la TRE, transformadas de Lorentz, velocidad angular</u></p> <p><b>(M) Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes:</b> <u>Apuntes del trabajo anterior con el fenómeno de simultaneidad</u></p> <p><b>(M) Elaboración y prueba de hipótesis:</b> <u>Propondrán hipótesis sobre el tiempo de llegada de los haces de luz usando los postulados de la TRE y las transformaciones de Lorentz</u></p>	<p><b>(M) Construcción y confrontación de argumentos:</b> <u>Los argumentos que construyan deberán sustentarse en la TRE</u></p> <p><b>(M, A) Representación y manejo de los datos obtenidos:</b> <u>En este caso se tienen unicamente los datos que especifican el experimento pensado, y se hará énfasis a los estudiantes para que hagan una representación gráfica de lo que sucederá en la nueva situación</u></p> <p><b>(M, A) Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas y (A) respaldo para apoyar ciertas justificaciones:</b> <u>Las afirmaciones deberán estar sustentadas en los postulados de la TRE y las transformaciones de Lorentz</u></p>	<p><b>(M) Generalización de los resultados:</b> <u>la nueva situación es sirve como base para plantear la generalización de la Teoría de la Relatividad Especial a la Teoría General de la Relatividad (donde se incluyen los sistemas de referencia no inerciales)</u></p> <p><b>(A) Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones:</b> <u>los estudiantes deberán discutir el MCE que el profesor exponga con sus afirmaciones.</u></p> <p><b>(A) Comparen sus ideas con posturas alternativas:</b> <u>comparar lo que sucede en la situación inicialmente propuesta con la nueva situación</u></p> <p><b>(A) Explicación:</b> <u>de la nueva situación.</u></p>
<p><b>Condiciones,</b> afirmaciones sobre el fenómeno, hipótesis teóricas.</p> <p><b>(A) Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera</b></p> <p><b>(A) Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple:</b> <u>las condiciones que se deberán mencionar es son el uso de sistemas inerciales, y los postulados de la TRE</u></p>		

Cuadro de construcción propia.



#### 4.1.5. Nueva situación, para la actividad de aplicación.

En la sección 3.2.1 se describió un arreglo experimental que consiste de una fuente de luz láser, un espejo parcialmente reflectante que divide el haz del láser en dos rayos que viajarán por un circuito Uno de ellos lo hará en sentido de las manecillas del reloj y el otro en sentido contrario (ver figura 3.2). La situación expuesta en dicha sección sitúa al arreglo en un sistema de referencia en movimiento, en donde hay un observador, que al detectar dos eventos  $b$  y  $d'$ , concluye que son simultáneos. Por otro lado, hay otro observador situado en un sistema de referencia en reposo que también detecta dichos eventos y para él no son simultáneos, con lo cual queda en evidencia que la simultaneidad es un fenómeno relativo al estado de movimiento del observador.

La situación nueva en esta sesión tendrá cambios para que los alumnos apliquen su conocimiento y construyan el modelo del fenómeno, que es resultado de la variación que se expondrá a continuación. Se partirá del arreglo de la figura (3.2) para explicar la nueva situación y mostrar que existe una similitud con la situación expuesta en la sección 3.2.1. Con la finalidad de simplificar la representación matemática del modelo correspondiente a la situación nueva, se harán ciertas variaciones que se exponen a continuación:

1. El arreglo junto con el observador están situados en un sistema de referencia en reposo.
2. El arreglo experimental se sitúa sobre una base paralela al suelo que puede girar libremente.
3. Por simplicidad, para expresar matemáticamente el modelo de la nueva situación, se supondrá que ahora el circuito será circular en vez de ser cuadrado tal como se muestra en el lado derecho de la figura (4.1). Del lado izquierdo se muestra el arreglo de la situación anterior (ver figura 3.2), situado sobre la base giratoria con la finalidad de que se note la similitud de ambas situaciones. Se elige el circuito circular debido a que el formalismo matemático se simplifica de este modo.
4. Para que sea posible una trayectoria circular es necesario suponer que el medio por donde se propagan ambos haces, en sentido de las manecillas y en sentido contrario, sea una fibra óptica cuyo índice de refracción será  $n$ .

5. Inicialmente la base se mantiene fija (sin girar) y el observador detecta que ambos rayos llegan al mismo tiempo al detector.
6. Posteriormente se hace girar la base en contra de las manecillas del reloj y el observador detecta que los dos haces llegan al detector con una diferencia de tiempo  $\Delta t$ .

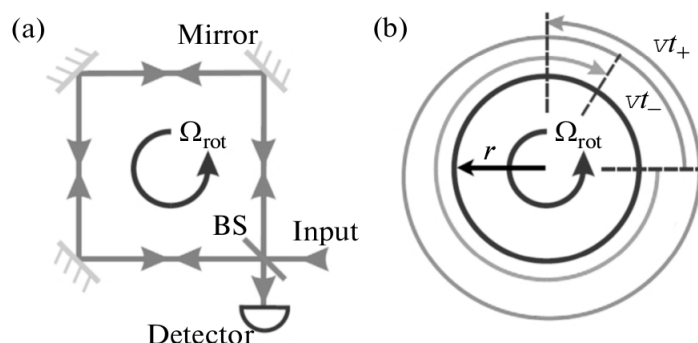


Figura 4.1: Efecto Sagnac Imagen extraída de Lipson, Lipson y Lipson (2010, p. 302).

A los estudiantes se les presentará la situación sin decirles el resultado y posteriormente se les pedirá que predigan lo que sucederá cuando se haga girar la base; a partir de ello se propiciará una discusión grupal para que ellos expongan sus ideas y argumenten, con la intención de que en el grupo se llegue a algún consenso. Posteriormente el profesor expondrá lo que sucede en el experimento y se discutirá con base en la predicción que se haya hecho en el grupo. Concluida dicha discusión el profesor desarrollará, con la participación de los alumnos, la expresión matemática del modelo para explicar el fenómeno en cuestión. A continuación se expondrá el Modelo Científico Experto del nuevo fenómeno expuesto en esta sección.

#### 4.1.5.1. Modelo Científico Experto de la nueva situación.

Se debe mencionar que este experimento es comúnmente conocido como efecto Sagnac, ya que fue propuesto por el físico francés Georges Marc Marie Sagnac en 1913, actualmente hay aplicaciones de este fenómeno, principalmente para hacer giróscopos ópticos. Como ya se mencionó el arreglo experimental rota sobre la base giratoria con una velocidad angular  $\Omega$  -en sentido de las manecillas del reloj- y se observa que hay una diferencia de fase -es decir que llegan a distintos

tiempos- entre los dos haces que se propagan en direcciones contrarias; debido a que el sistema está en un sistema de referencia no inercial (por estar rotando), la explicación del fenómeno debe hacerse utilizando la Teoría de la Relatividad General (TRG); pero como no hay campos gravitacionales involucrados la TRE y la TRG dan el mismo resultado, o explicación. A continuación se explicará la nueva situación tomando como referencia a Lipson, Lipson y Lipson (2010) y Rahaman (2014).

Como se mencionó antes, por simplicidad se elige un circuito circular, de radio  $R$ , conformado por una fibra óptica con índice de refracción  $n$ . La longitud de una vuelta del circuito es  $L = 2\pi R$ , mientras que la velocidad de giro del sistema es  $v = R\Omega$ . Para explicar la diferencia de tiempos de llegada entre los dos haces, en sentido del giro ( $c_+$ ) y en contra ( $c_-$ ), es necesario determinar la velocidad con la que se propagan, según un observador situado en el sistema de referencia del laboratorio (que no está girando con el sistema).

Se denotarán a las velocidades en el sistema de referencia en reposo como  $c_+$  y  $c_-$ . Entonces, el tiempo que tarda el haz (en sentido de las manecillas) en llegar al detector es  $t_+$ , dado que el sistema completo está girando en sentido de las manecillas del reloj, el haz cuya velocidad es  $c_+$  recorre una distancia mayor en ese tiempo,  $L + R\Omega t_+$ , por lo que se tiene la siguiente ecuación

$$c_+ t_+ = L + R\Omega t_+ \quad (4.1)$$

de forma similar, el haz en sentido contrario a la manecillas del reloj (en contra del giro del sistema) recorre una distancia menor dada por

$$c_- t_- = L - R\Omega t_- \quad (4.2)$$

Para determinar la diferencia de tiempo con que ambos haces llegan al detector, basta despejar los tiempos  $t_+$  y  $t_-$  de las ecuaciones (4.1) y (4.2) y restarlos

$$\Delta t = t_+ - t_- = L \left[ \frac{1}{c_+ - R\Omega} - \frac{1}{c_- + R\Omega} \right] \quad (4.3)$$

Para determinar completamente  $\Delta t$ , se deben conocer explícitamente las velocidades  $c_+$  y  $c_-$  y

para ello se deberán utilizar las transformaciones de Lorentz entre tres sistemas de referencia. En primer lugar está el sistema de referencia del laboratorio  $S$ , en reposo, en segundo lugar el sistema de referencia anclado a la mesa giratoria  $S^1$  y por último un sistema de referencia que viaja con uno de los haces de luz,  $S^{(2)}$ . El paréntesis que se coloca es para que el superíndice 2 no se confunda con la potencia al cuadrado, de las coordenadas del sistema  $S^{(2)}$ .

Para poder utilizar las transformaciones de Lorentz (3.21) y (3.22) haremos una transformación de coordenadas tomando  $x = R\theta$  para denotar la posición en el circuito circular. Con esto las transformaciones de Lorentz para transformar las coordenadas entre los sistemas  $S$  y  $S^1$  se reescriben del siguiente modo

$$R\theta^1 = \frac{(R\theta - vt)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.4)$$

$$t^1 = \frac{t - \frac{vR\theta}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.5)$$

donde  $v = R\Omega$  es la velocidad con la que rota la fibra óptica. Ahora las transformaciones de Lorentz entre los sistemas  $S^1$  y  $S^{(2)}$  serán

$$R\theta^{(2)} = \frac{(R\theta^1 - ut^1)}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (4.6)$$

$$t^{(2)} = \frac{t^1 - \frac{uR\theta^1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (4.7)$$

donde  $u = c/n$  es la velocidad de la luz en el medio con índice de refracción  $n$ . Posteriormente para determinar la velocidad se sustituyen las ecuaciones (4.4) y (4.5) en las ecuaciones (4.6)

$$R\theta^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 + \frac{uv}{c^2}\right) \left[ R\theta - t \left( \frac{u+v}{1 + \frac{uv}{c^2}} \right) \right] \quad (4.8)$$

en donde el término  $\left(\frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}\right)$  es la velocidad de propagación de los haces de luz, medidos desde el sistema de referencia del laboratorio, es decir

$$c_{\pm} = \left(\frac{u \pm v}{1 \pm \frac{uv}{c^2}}\right) \quad (4.9)$$

el signo de  $v$  dependerá del sentido en que cada haz recorre el circuito. Por ejemplo el haz que viaja en la dirección de giro de todo el sistema tiene una velocidad relativa al medio -fibra óptica- en el mismo sentido y por tanto el signo de  $v$  será positivo. En el caso contrario, cuando el otro haz recorre el circuito en sentido contrario al giro, tiene una velocidad relativa contraria al medio, por lo que el signo de  $v$  será negativo. Sustituyendo  $u = c/n$ , se obtiene lo siguiente

$$c_{\pm} = \frac{c/n \pm v}{1 \pm v/nc} \quad (4.10)$$

Por último, para determinar la diferencia de tiempo en que llegan ambos haces de luz al detector se sustituye la ecuación (4.10) para  $c_+$  y  $c_-$  en la ecuación (4.3) se obtiene lo siguiente

$$\Delta t = \frac{2LR\Omega}{c^2 - R^2\Omega^2} \simeq \frac{2LR\Omega}{c^2} \quad (4.11)$$

Se debe notar que en la ecuación (4.11) no hay dependencia con el índice de refracción, además si se sustituye  $L = 2\pi R$  en la ecuación (4.11) se obtiene que

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2\Omega}{c^2} = \frac{4A\Omega}{c^2} \quad (4.12)$$

la diferencia de tiempo depende del área del circuito,  $A$ . También es posible hacer que los rayos de luz recorran varias veces el mismo circuito por medio de una fibra óptica que de varias vueltas, por lo que  $\Delta t = \frac{4NA\Omega}{c^2}$ . De este modo es posible hacer mayor la diferencia de tiempo  $\Delta t$  aumentando el área del circuito, el número de vueltas o la velocidad angular  $\Omega$ .

#### 4.1.5.2. Discusión de la situación nueva

El análisis del efecto Sagnac se hará tomando en cuenta la discusión que desarrolla Malykin (2000). Malykin menciona que el análisis del efecto Sagnac desde sistemas de referencia inerciales mediante la TRE, se basa en el hecho de que esta teoría permite utilizar las transformaciones cinemáticas de la relatividad; no solamente en el caso de tener movimiento uniforme (para puntos sin masa), sino también en el caso de que exista aceleración.

Para sistemas no inerciales en principio debiera utilizarse la Teoría de la Relatividad General (TRG), pero se puede prescindir de su uso sí solamente están presentes efectos cinemáticos en la situación a considerar. Además, en la ausencia de campos gravitacionales no hay curvatura del espacio y los sistemas no inerciales de referencia se pueden describir en términos de la TRE sin importar que estén acelerados.

El efecto Sagnac es una consecuencia directa de ley de adición de velocidades de la TRE (ecuación 4.10), por lo que este fenómeno se considera de tipo cinemático dentro de la TRE; sin embargo en ocasiones se le considera en términos de la TRG.

Malykin (2000) menciona que es sencillo analizar el efecto Sagnac con la TRG cuando no hay algún medio en el anillo circular y que en presencia de algún medio óptico el uso de la TRG complica las cosas y puede conducir a errores, a sí mismo señala que el uso de la TRG es relevante cuando la velocidad angular es grande y también cuando se toman en cuenta los efectos de los campos gravitacionales.

En el artículo donde Malykin (2000) discute el efecto Sagnac, también se puede encontrar una explicación de dicho fenómeno hecha con por medio de la mecánica clásica, que arroja el mismo resultado hecho con la TRE (ecuación 4.12), pero que conduce a errores cuando se aplica a ondas no relativistas propagándose en un medio cuyo coeficiente de arrastre sea igual a uno, tal es el caso de las ondas sonoras y de las ondas magnetostáticas.

Malykin (2000) menciona que el hecho de obtener el mismo resultado por diferentes métodos (clásico, TRE y TRG), no necesariamente significa que el fenómeno se puede explicar de diferentes maneras, bien podría ser que al llegar a un resultado correcto por un método incorrecto se pueda

entorpecer la comprensión del fenómeno mismo. Por eso el autor de dicho artículo menciona que una explicación se considerará correcta si permite obtener una expresión exacta para la diferencia de fase entre los haces que se propagan en direcciones contrarias, sin imponer limitaciones particulares en los parámetros del sistema. Tales parámetros son la velocidad de rotación del dispositivo experimental, la velocidad de las ondas que se propaguen (incluyendo ondas de Broglie) o de objetos materiales que se muevan, respecto a un sistema de referencia que rote junto con el dispositivo experimental, la masa del objeto material, etc. Finalmente se puede decir que las explicaciones correctas del efecto Sagnac se basan en la aplicación de la Teoría de la Relatividad.

## **Capítulo 5**

# **DISCUSIÓN SOBRE LOS APORTES DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA PROPUESTA**

Como cierre del presente trabajo se discutirán los aportes realizados con esta contribución. Las principales aportaciones giran entorno a los siguientes aspectos: 1) aporte sobre la conceptualización de modelo (sección 2.1.1); 2) aporte de la conceptualización de modelización y, la conjunción de ella con el manejo de la argumentación y la metacognición (sección 2.3); 3) aporte sobre el Modelo Curricular, previo al nivel en el que se desarrollará la ED (sección 3.4.2); y además se discutirán las ventajas de la ED diseñada en este trabajo, en comparación con las ED's que se hallaron en la literatura (sobre aspectos de la TRE).

### **5.1. APORTE SOBRE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE MODELO**

En la sección 2.1.1 se hizo una revisión de los antecedentes del semanticismo también denominada como concepción de modelos de la ciencia, donde se ve a los modelos con una mayor relevancia que las teorías científicas, ya que por medio de los modelos se propone que conocemos al mundo. En



dicha sección se expuso la conceptualización de los modelos desde el semanticismo. Esta propuesta se inspiró en el trabajo de Gutierrez (2014), donde hace una “aproximación ontológica” (p. 49) acerca de los modelos. En esta aproximación menciona que los “constituyentes ontológicos de un modelo científico son: un conjunto de **entidades** con sus **propiedades** características; y un conjunto de **enunciados legales**, relativo a los comportamientos de las entidades consideradas en el modelo” (Gutierrez 2014, p. 50).

En la propuesta del presente trabajo se hace una nueva propuesta para conceptualizar los modelos. En el aporte de este trabajo se mantiene a las **entidades** con sus **propiedades** características que menciona Gutierrez (2014) y se opta por no utilizar lo que la autora identifica como enunciados legales, si no que se especificarán además las **relaciones** entre las entidades, las **condiciones** en las que es válido el modelo (y con las cuales es posible determinar a su vez a las entidades y sus relaciones mismas) y las **reglas de inferencia**, que corresponden a las leyes, dentro de la teoría en la que se circunscribe la explicación del fenómeno.

La fundamentación teórica sobre los modelos se realizó por medio de una revisión bibliográfica referente al semanticismo (ver la sección 2.1.1), de donde se deriva la visión de modelos de la ciencia. Con esta fundamentación se clarifica la forma en que se puede operar con los modelos para el diseño de Estrategias Didácticas, ya que hacen más precisiones acerca de los aspectos que conforman un modelo. Por un lado, permite ver la forma de determinar las entidades del modelo, debido a que en ocasiones algo se puede considerar como una entidad para un modelo con limitaciones, mientras que para un modelo más elaborado se deben hacer precisiones que posiblemente no permitan considerar algo como una entidad. La síntesis propuesta también permite hacer más precisiones sobre las propiedades y relaciones entre las entidades debido a que se debe considerar la teoría que permitirá especificar las reglas de inferencia (leyes y principios). Con lo anterior, también es posible ver más detalles sobre el proceso de modelización, ya que al construir modelos se elige la simplicidad y limitaciones del mismo (según los objetivos que se persigan) en términos de las entidades, propiedades, relaciones y condiciones del modelo. Lo anterior es una práctica común que siguen los científicos con la finalidad de elaborar explicaciones que sean lo más sencillas posibles.

## 5.2. MODELIZACIÓN Y SU CONJUNCIÓN CON EL MANEJO DE LA ARGUMENTACIÓN Y LA METACOGNICIÓN

Para poder trabajar con modelos, no es suficiente disponer únicamente de una buena concepción de lo que es un modelo, también es necesario disponer de una idea clara de lo que significa “construir” y/o “manejar” un modelo. Para lograr lo anterior se hizo una revisión bibliográfica y se eligieron dos propuestas que permitieron hacer la propuesta para desarrollar la argumentación y metacognición. En primer lugar se consideró la propuesta de Justi y Gilbert (2002) y en segundo lugar la de Hughes (1997), ver sección 2.2.

En el trabajo de Adúriz-Bravo e Izquierdo (2003) se menciona que en el campo de la Educación en Ciencias confluyen diversas líneas de trabajo para la investigación. Por un lado se encuentra la visión de ciencia, que es de utilidad para entender cómo se genera el conocimiento científico, la visión de modelos tiene ese papel teórico y además aporta elementos metodológicos para la propuesta de este trabajo.

Además de la visión de ciencia, Izquierdo-Aymerich y Adúriz Bravo (2003) señalan que en el campo de la Educación en Ciencias son de gran importancia la inclusión de la metacognición y la argumentación en las clases. Chion, Meinardi, y Adúriz-Bravo (2014) mencionan que existe una gran variedad de grupos que realizan aportes entorno a la argumentación, entre los cuales existen varios acuerdos, que se pueden resumir del siguiente modo: reconocer la importancia de la argumentación en los distintos niveles educativos; la necesidad de encontrar formas de incluir la enseñanza, explícita, de dicha habilidad dentro del currículo; y privilegiar el diálogo en las aulas, además de generar las condiciones para que las relaciones de los alumnos con el profesor y entre ellos esté permeada por el diálogo, de modo que la dinámica en el salón de clases y fuera de él no sea la tradicional. Con esto se pretende propiciar la “discusión y regulación de los argumentos producidos” (Revel y Adúriz-Bravo, 2014, p. 120).

Izquierdo-Aymerich y Adúriz Bravo (2003) concluyen que es posible el manejo de la argumentación por parte de los alumnos mediante actividades cognitivas y metacognitivas de modo que se

comparta esta actividad socialmente, y de este modo se aprenda a “*argumentar en ciencias argumentando y reflexionando sobre la argumentación*” (Izquierdo-Aymerich y Adúriz Bravo, 2003, p. 120), y al mismo tiempo se construya el conocimiento científico en el aula.

Tomando en cuenta las aportaciones antes mencionadas, es que se propuso en este trabajo relacionar la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013) con las propuestas hechas (en este trabajo) de modelo, modelización junto con la síntesis sobre metacognición y argumentación. Con lo anterior se pudo elaborar una propuesta esquemática sobre la modelización (ver tabla 2.4), y de este modo se enriqueció la propuesta de los autores antes mencionados. Con el aporte de este trabajo, se abre la posibilidad de que los estudiantes trabajen directamente los modelos, que ellos sean conscientes del proceso de modelización, y dispongan de estrategias y elementos teóricos sobre su aprendizaje para superar las dificultades que encuentren al estudiar.

En este sentido, los aportes de relevancia de este trabajo se encuentran los cuadros (2.3), (2.2) y (2.4), que resumen los hallazgos teóricos hechos durante la revisión bibliográfica sobre la argumentación, la metacognición y la interrelación de los anteriores con la síntesis propuesta sobre los modelos. Dichos cuadros se incluyen en el diseño de la ED para enseñar a los estudiantes a modelizar, a que se autoevalúen y también para evaluarlos con los criterios del cuadro 2.4. Además se promueve la autoevaluación y el autoaprendizaje por parte de los alumnos y el trabajo colaborativo para discutir y argumentar sus ideas.

### **5.3. MODELO CURRICULAR, PREVIO AL NIVEL EN QUE SE IMPLEMENTARÁ LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA**

En la sección 3.4.1 se analizan los antecedentes curriculares que un alumno de cuarto semestre de la Licenciatura en Física, de la Facultad de Ciencias de la UNAM, ha cubierto antes de inscribirse al curso de Electromagnetismo I. Dicha revisión permite tener una idea de las herramientas matemáticas que el alumno en principio puede manejar, además de los conocimientos previos que podrían tener los estudiantes. En el caso de este trabajo, es importante determinar qué contenido han

cubierto en relación a lo que se abordará en la ED (el fenómeno de la simultaneidad enmarcado en la TRE).

Una vez hecha la revisión de los antecedentes curriculares, es posible postular el modelo que se podría esperar que construyera un alumno antes de cursar la unidad diez de Electromagnetismo I, donde se aborda la TRE. El modelo postulado de este modo es complementario al Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial (MCA inicial) que se presentó en la sección 3.5, con base en las investigaciones reportadas en el cuadro (1.1). En dichas investigaciones se reportan ideas previas de estudiantes sobre aspectos relativos a la TRE (dilatación del tiempo, contracción de la longitud, simultaneidad, etc.) y con ellas se postula el MCA inicial, que sirve de referente (de inicio) para el diseño de la ED.

La importancia de postular el Modelo Curricular que podrían construir los alumnos antes del curso de relatividad, radica en que éste puede ser de utilidad en el caso de no contar con o carecer de acceso a revistas especializadas que reporten ideas previas de los estudiantes sobre algún tema o fenómeno en particular, para proponer el MCA inicial.

También permitió descubrir que en segundo semestre los alumnos tienen un manejo más formal de los modelos, a partir del segundo semestre. Con lo anterior se puede fundamentar la suposición de que los alumnos tienen ideas de lo que es un modelo, además de cómo se construye y se utiliza. Entonces el hacer un análisis del currículo previo al nivel en que se trabajará sirve para no pasar por alto cuestiones que pueden resultar fundamentales o de gran interés para el diseño de la ED, o bien para adecuar el currículo que se vaya a abordar.

## **5.4. VENTAJAS DE LA ESTRATEGIA DIDÁCTICA DISEÑADA EN ESTE TRABAJO**

A continuación se describirán las ED en torno a la TRE a nivel universitario y los resultados que reportan éstas; posteriormente se discutirán las diferencias entre dichas propuestas y la ED que se presenta en este trabajo, además se discutirán las posibilidades futuras de este trabajo con miras a extenderlo.

### 5.4.1. Estrategias Didácticas, halladas, alrededor de la Teoría de la Relatividad Especial a nivel universitario

En el cuadro (1.1) se presentan investigaciones que reportan ideas previas y Estrategias Didácticas, ambas a nivel universitario. De la tabla presentada, la referencia más antigua que reportan la aplicación de una ED son la de Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger (1978); la de Scherr, Shaffer y Vokos (2002) y la de Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009). A continuación se describirán los investigaciones antes citadas y más adelante se discutirán sus ventajas y desventajas, respecto a la ED de esta aportación.

Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger (1978) reportan la aplicación de una ED con alumnos de primer y segundo año de universidad de las carreras de ingeniería, matemáticas y física. En su diseño los autores enuncian como propósitos, al aplicar su ED, que los estudiantes "participen en el desarrollo del pensamiento científico ... creando en ellos la necesidad de introducir nuevos conceptos"; que los alumnos "ejerciten su habilidad para formular y analizar hipótesis alternativas mediante el análisis conceptual de resultados no esperados" (comúnmente como paradojas relativistas); "enseñar a los estudiantes a discutir, a escuchar a otras personas y a vivir con ciertas incertidumbres" y a enseñar a los estudiantes a "juzgar las implicaciones sociales de la tecnología resultante de los progresos teóricos" (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978, p. 1258).

La ED propuesta por Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger (1978), la dividen en cinco secciones, cada una de ellas consta de tres o cuatro clases de dos horas. En cada sección se aborda algún aspecto de la TRE y a lo largo de las sesiones se realizan distintas actividades para concretar los propósitos enunciados por los autores.

Para desarrollar el pensamiento científico los autores proponen presentar (por medio de un vídeo) a los estudiantes fenómenos relativistas y a partir de ellos generar discusiones grupales guiadas por preguntas del tipo: "¿qué puede hacer un científico cuando se enfrenta con una discrepancia fundamental entre la predicción teórica y la evidencia experimental?". Además los autores consideran generar la necesidad (en los alumnos) de introducir nuevos conceptos. Con esta finalidad, en la cuarta

sección de la ED, se presenta a los alumnos una situación hipotética que se pueda explicar mediante la física clásica y que posibilite generar inconsistencias con la Teoría de la Relatividad Especial (TRE). Las inconsistencias surgen a partir de la introducción de un nuevo concepto por parte del docente, el cual permita trasladar la situación hipotética inicial a otra situación que necesariamente se explique en el marco de la TRE.

Para el propósito de formular hipótesis, en la primera sección se les pide que formulen una hipótesis para explicar el fenómeno que vieron. Mientras que en la segunda sección de la ED se sigue una dinámica similar, se les muestra con un video un fenómeno relativista y posteriormente se les presentan posibles hipótesis para explicar dicho fenómeno, a partir de ellas los alumnos tienen que discutir para determinar cuál de ellas es la más adecuada.

Para el propósito de enseñar a los estudiantes a discutir se propone en la segunda sección de la ED una dinámica en la que los alumnos toman algún rol dentro de un diálogo ficticio, con la finalidad de que ellos discutan a partir de una postura preestablecida para el rol que se les asigne.

Por último, para el propósito de enseñar a los estudiantes a juzgar las implicaciones sociales de la tecnología resultante de los avances científicos, los autores realizaron, en la última sección de la ED, una discusión grupal a partir de pedir a los estudiantes que "discutan algunas formas en que la relatividad ha influenciado la historia de la humanidad".

Entre las conclusiones que destacan Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger (1978), se destaca que es difícil para los profesores abandonar el papel tradicional, en el que da toda la información a los estudiantes y toma un papel dominante en las discusiones de clase, por esa razón proponen que los profesores deben tener algún tipo de preparación para conducir las clases con el mínimo de intervenciones. También los autores mencionan que encontraron problemas al realizar discusiones abiertas, ya que no siempre se desarrollan las ideas tal como se manejan en la comunidad científica y que en ocasiones hace falta tiempo para llevar las clases del modo que ellos proponen, por lo que se dificulta cubrir todo el contenido de un temario.

A continuación se expondrá, a grandes rasgos, la ED reportada por Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009), para después poder compararla con la ED propuesta en este trabajo.

La propuesta de Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009), consiste en una ED dividida en tres etapas: la primera es una sesión que se desarrolla en el aula, la segunda etapa consiste en una visita al museo con la finalidad de que los estudiantes recorran una exposición sobre la TRE, y la tercera etapa se lleva a cabo en el aula. Los autores mencionados asumen un modelo contextual del aprendizaje y por esa razón consideran realizar una visita al museo. En su propuesta mencionan que el aprendizaje tiene lugar en situaciones específicas y que es necesario guiar estas experiencias para que éste sea significativo.

En la primera etapa se comienza con un cuestionario que responden los estudiantes de forma individual acerca de la TRE y las implicaciones sociales de esta teoría. Después de terminar con el cuestionario se organiza una debate grupal en torno a cuatro temas propuestos "telecomunicaciones, tus segundos son más largos que los míos, ¿los muones son jóvenes o viejos? y Experimento en el CERN" (Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009, p. 2088). Para el debate se formaron pequeños grupos de alumnos con la finalidad de que discutieran en equipo un tema propuesto y al finalizar esta actividad se organizó una mesa redonda. Los autores mencionan que durante el desarrollo de la discusión el docente solicitaba continuamente a los estudiantes que sus explicaciones estuvieran basadas en evidencias o en argumentos científicos.

En la segunda etapa se llevó al grupo completo de estudiantes a visitar el museo para que recorrieran en grupos pequeños y de forma libre una exposición sobre la TRE. En esta etapa el profesor acompañaba de forma intermitente a cada grupo y les hacía preguntas de la exposición para que profundizaran en la información de cada panel de la exposición.

Por último en la tercera etapa, los estudiantes reflexionaron sobre lo que vieron en la exposición y analizaron si su conocimiento cambió, respecto a las respuestas de su cuestionario inicial, que podían revisar en esta última etapa. Para finalizar la ED, cada estudiante realizó un reporte final a partir de unas preguntas guía proporcionadas por el docente.

Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009) concluyen de su estudio que la ED diseñada por ellos junto con la visita al museo, incrementó el interés, conocimiento y comprensión de la TRE, además de sus aplicaciones. Los autores también reportan que al finalizar la aplicación

de su propuesta, la mayoría de los estudiantes pueden justificar la invarianza de la velocidad de la luz; pero que con otros fenómenos, como la dilatación del tiempo y la dependencia de la masa con la velocidad, los estudiantes tienen mayores dificultades, ya que sólo un número reducido de los estudiantes que participaron en su estudio, lograron una comprensión adecuada de ellos. Por último, Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno (2009) reportan que sólo la mitad de los alumnos involucrados en la ED mostraron habilidad para argumentar y justificar científicamente tanto sus ideas como sus afirmaciones en torno a la TRE. Lo anterior suponen que se debe a la falta de uso de la argumentación en las clases de ciencia.

Para finalizar se presentarán los aspectos más importantes del trabajo de Scherr, Shaffer y Vokos (2002), en el cual los autores reportan el diseño de tutoriales diseñados para “complementar las lecturas y libros de texto de los cursos tradicionales” cuyo énfasis es “construir conceptos, desarrollar habilidades de razonamiento y relacionar el formalismo de la física con el mundo real” (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002, p. 1239). Los autores reportan que los tutoriales comienzan con un cuestionario inicial de tipo cualitativo que debe responderse con explicaciones y razonamientos; posteriormente los estudiantes trabajan colaborativamente en grupos pequeños para responder “preguntas cuidadosamente secuenciadas” con la finalidad de conducir a los estudiantes “a través del razonamiento necesario para desarrollar y aplicar algún concepto” (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002, p. 1239).

En el primer tutorial se guía a los estudiantes para que definan un sistema de referencia y para que desarrollen una definición de la simultaneidad de dos eventos espacialmente separados; mientras que en el segundo tutorial, se conduce a los estudiantes para que analicen las consecuencias de la invarianza de la velocidad de la luz. Algo importante por remarcar es que “el contenido de los tutoriales no difiere significativamente de lo que típicamente se enseña en un curso de relatividad especial”.

Entre las estrategias que reportan los autores dentro de los tutoriales, mencionan tres etapas; la primera se denomina “elicitación” y en ella se los estudiantes se les “presenta con una situación que expone una tendencia a cometer un error particular” (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002, p. 1239); la segunda etapa “confrontación”, “ocurre cuando los estudiantes reconocen una discrepancia entre sus



ideas y el comportamiento del sistema físico”(Scherr, Shaffer y Vokos, 2002, p. 1239); por último la etapa denominada como “resolución” consiste en “guiar a los estudiantes a través del razonamiento necesario para resolver las inconsistencias” (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002, p. 1239).

Scherr, Shaffer y Vokos (2002) mencionan que las dificultades de los estudiantes con la TRE se puede inferir que son causa de tener una comprensión deficiente de conceptos más básicos y que después de trabajar con los tutoriales muestran una mejora considerable para resolver algunas de las paradojas más comunes de la TRE.

#### **5.4.2. Fortalezas de la Estrategia Didáctica propuesta en este trabajo**

Una de las fortalezas que se pueden resaltar de la presente contribución que aquí se expone es la propuesta de una conceptualización más robusta, y por lo tanto de aplicación más general para fundamentar la ED. Se hizo una propuesta teórica de lo que es un modelo, así como del proceso de modelización. Lo anterior permitiría abordar, en la enseñanza de la física, temas de mayor complejidad. Por ejemplo sería posible aproximarse a fenómenos de la mecánica cuántica, de las ciencias de materiales, termodinámica, etc.

Otra fortaleza de este trabajo es el uso de la argumentación y la metacognición dentro del proceso de modelización. En las propuestas discutidas en la sección anterior, si bien se propone el uso de discusiones en clase, no se especifican de forma clara los criterios que se toman en cuenta para realizar esto a lo largo de la ED, y no se mencionan estrategias o aproximaciones para registrar el manejo y desarrollo de las discusiones con los estudiantes. En este trabajo se cuentan con criterios específicos para trabajar explícitamente, los aspectos que se consideran relevantes para el desarrollo de la metacognición y la argumentación (cuadros 2.3 y 2.2) durante las discusiones en clase, mismos que serán utilizados para evaluar su manejo por parte de los alumnos en el proceso de modelización (ver cuadro 2.4).

Por otro lado también se propone una forma alternativa o complementaria para postular la construcción posible de los alumnos, en términos de modelos, antes de llevar un curso determinado (ver sección 3.4.2). Lo anterior es de utilidad en el caso de que un docente no cuente con acceso a revistas

especializadas donde se reporten ideas previas de los estudiantes, o bien no existan trabajos previos para proponer el Modelo Curricular inicial de los alumnos.

Además en el diseño de la ED se hizo uso de la propuesta de Burgh y Nichols (2012) basada en las comunidades de indagación de Lipman, que pone en juego las similitudes que hay entre la indagación filosófica con la indagación científica. Esto permite involucrar a los estudiantes en las prácticas y normas de los científicos y además promueve la participación democrática de todos los alumnos en el aula.

Con los aspectos antes mencionados se dispone e varias herramientas para desarrollar la auto-evaluación de los alumnos, su autoaprendizaje, el uso de argumentos para la comunicación de sus explicaciones a la comunidad, la comprensión más sistemática de los fenómenos y el desarrollo de una meta-visión del proceso con el que se construye el conocimiento científico. Esto último se puede complementar con el desarrollo histórico que queda por incluir en la continuación de esta ED, con ayuda de los textos de divulgación que se produjeron (Pérez, 2016 a, b y c) para fundamentar el marco disciplinar de la física para abordar la Teoría de la Relatividad Especial.

## Capítulo 6

# CONCLUSIONES

Este trabajo parte de la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013), que a grandes rasgos consiste en el diseño de Estrategias Didácticas con el enfoque de los modelos. En ella se toman como referentes las ideas previas de los estudiantes y por medio de ellas se postula el Modelo de los Alumnos inicial (MCA inicial) que tendrán sobre un fenómeno particular -en este trabajo se eligió el fenómeno de la simultaneidad. Otro referente es al currículo, con el que se establecen los contenidos a abordar en un curso dentro de una institución educativa. A partir de él se infiere el Modelo Curricular (MC), que es una postulación del modelo de los alumnos después de tomar el curso. También se considera el Modelo Científico Experto (MCE), que es el modelo -o uno de los modelos- que usan los científicos para explicar cierto fenómeno. Con esos tres modelos (MCA inicial, MC y MCE) se postula el modelo que podrían alcanzar los estudiantes al finalizar la estrategia didáctica -con el enfoque de modelos, al cual se le denota como Modelo Científico Escolar de Arribo (MCEA). De lo antes expuesto se puede ver que para evaluar el avance final de los estudiantes en términos de modelos, el docente debería nuevamente traducir las ideas de los estudiantes al concluir la ED, para poder determinar si se lograron llegar al MCEA.

La propuesta de este trabajo se centra abordar con los estudiantes lo que es un modelo y el proceso de modelización, con la finalidad de que los estudiantes se apropien de las prácticas de los científicos expertos, con este enfoque se puede decir que además se facilita la evaluación de

los modelos que construyan los estudiantes, ya que se tendría acceso a ellos de primera mano. Por esa razón en esta aportación se tuvo la necesidad de proponer una síntesis sobre qué es un modelo y otra para entender el proceso de modelización. En estas propuestas se incluyó el manejo de la metacognición y la argumentación por considerar que dichas prácticas están presentes al momento de construir modelos. Lo anterior es un aporte al campo de Educación en Ciencias, y es necesario probar su implementación en el aula por tiempos prolongados para desarrollar el uso de la metacognición y la argumentación en los alumnos.

Otra cuestión que se realizó para facilitar el trabajo del docente al implementar la propuesta de López-Mota y Rodríguez-Pineda (2013), fue adecuar el currículo para que de inicio el Modelo Curricular no estuviera tan alejado de el Modelo Cognitivo de los Alumnos inicial. La tarea se simplificó aún más al aprovechar una práctica que los científicos hacen al momento de modelizar, eligen el modelo más sencillo posible que les permita explicar un fenómeno. Dicho modelo puede tener muchas limitaciones; pero los científicos expertos están conscientes de ellas y saben que con él les basta para explicar algún aspecto del fenómeno en cuestión. Con lo anterior se eligió el Modelo Científico Experto de modo no estuviera muy alejado del Modelo Curricular y con ello se logró que el Modelo Científico Escolar de Arribo se pudiera postular muy similar al MC y al MCE,  $MC = MCE \simeq MCEA$ . Con esta simplificación se puede decir que es más operativo para el docente trabajar con modelos al diseñar Estrategias Didácticas.

Otro aspecto que se debe resaltar de esta propuesta es que en la primera sesión de la Estrategia Didáctica se diseñó una actividad basada en la propuesta de Burgh y Nichols (2012) basada en las "comunidades de indagación" -que retoman de Lipman (2003). Los autores antes mencionados señalan que con este tipo de actividades es posible involucrar a los estudiantes en las prácticas y normas de la comunidad científica. Además mencionan que este tipo de actividades promueven el uso de la auto evaluación, la acción y reflexión. Con ello se prioriza la comprensión, interpretación, la representación y posibilita dar significado lo que se aprende. Es importante mencionar que durante el desarrollo de las demás actividades de la ED propuesta en este trabajo se deberá seguir la propuesta de Burgh y Nichols (2012), ya que han mostrado resultados favorables en la implementación piloto

de la primera sesión de esta ED en otros cursos de ingeniería a nivel universitario. De igual modo se hizo una implementación piloto para probar la pertinencia en el aula de la síntesis de modelo propuesta y se obtuvieron buenos resultados con los estudiantes. El fenómeno de partida que se usó para la implementación piloto fue el encendido de un foco al conectarlo a un circuito eléctrico alimentado con el voltaje de una pila.

En la propuesta de Burgh y Nichols (2012) se hace una comparación entre la indagación en la ciencia y la indagación en la filosofía, y ellos argumentan que existen similitudes que pueden explotarse y desarrollarse en la enseñanza de las ciencias. Este enfoque empata muy bien con la ED aquí propuesta, ya que de inicio se tuvo que hacer una revisión bibliográfica, desde la filosofía, para entender la visión semanticista de la ciencia que le da un lugar preponderante a los modelos. Según Frigg y Hartmann (2006) hay tres aspectos que nos ayudan a entender a los modelos, una es su ontología (qué son y cómo se conforman), la epistemología de los modelos (cómo conocemos mediante su uso) y el tercero es la relación de ellos con las teorías. En este trabajo se enfatizó a los dos primeros aspectos, ya que son los que se proponen para trabajar en el aula durante el proceso de modelización. Con lo anterior se puede ver que la base de este trabajo tiene una fundamentación que proviene desde la filosofía y por lo tanto es importante comunicar esto a los estudiantes para contextualizar el trabajo a realizar con ellos.

También se considera que es necesario incluir aspectos históricos de la ciencia, ya que permiten visualizar el desarrollo del conocimiento científico a lo largo del tiempo. Lo anterior no quedó plasmado en la ED; pero al momento de construir el Modelo Científico Experto del fenómeno de simultaneidad relativista se tuvo que hacer una revisión bibliográfica desde el campo de la física. A partir de dicha revisión se elaboraron tres textos de divulgación científica (Pérez, 2016a, 2016b y 2016c) en los que se trata de responder qué es el espacio y el tiempo, qué es la masa y uno más sobre el péndulo simple, dispositivo fundamental para el surgimiento de la física como la conocemos hoy en día que se usó para medir el tiempo y para observar diversos fenómenos como la gravedad terrestre, la rotación de la Tierra, la no existencia del éter, etc. Dichos textos de divulgación permiten ver el desarrollo histórico de la física, lo cual se vinculará con el manejo de los procesos metacognitivos

por parte de los alumnos, es decir el desarrollo de una meta-visión de la ciencia que permita hacer conscientes a los alumnos del proceso de construcción del conocimiento científico. Se aclara que esto último no se incluye en este trabajo y se desarrolla para futuras aportaciones.

Por último se deberá probar la propuesta de modelo y de la modelización, hecha en esta aportación, en conjunción con el uso de la metacognición y argumentación con otros fenómenos que se expliquen desde la mecánica clásica, la termodinámica, mecánica estadística, electromagnetismo y mecánica cuántica. Esto, se deberá hacer con la finalidad de analizar las limitaciones de la propuesta.

# Referencias

- Adúriz-Bravo, A. e Izquierdo-Aymerich, M. (2002). Acerca de la didáctica de las ciencias como disciplina autónoma. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 1 (3), 130-140.
- Alemañ R. y Pérez J. F. (2000). Enseñanza por cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), 463-471.
- Anderson, D., Nashon, S. M. & Thomas, G. P. (2009). Evolution of research methods for probing and understanding metacognition. *Research in Science Education*, 39(2), 181-195.
- Angotti, J. A. P., Caldas, I. L., Delizoicov D., Rüdinger E. (1978). Teaching relativity with a different philosophy. *American Journal of Physics*, 46(12), 1258-1262.
- Appleton, K., & Asoko, H. (1996). A case study of a teacher's progress toward using a constructivist view of learning to inform teaching in elementary science. *Science education*, 80(2), 165-180.
- Arriasecq, I., y Greca, I. (2004). Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo poli-modal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 211-227.
- Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2007). Approaches to the teaching of special relativity theory in high school and university textbooks of Argentina. *Science & Education*, 16(1), 65-86.
- Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2012). A teaching-learning sequence for the special relativity theory at high school level historically and epistemologically contextualized. *Science & Education*, 21(6), 827-851.
- Ávila, A., Carrasco Altamirano, A., Gómez Galindo, A., Guerra Ramos, T., López-Bonilla, G. Y

- Ramírez, J. (Coords.) (2013). *Una década de investigación educativa en conocimientos disciplinares en México. Matemáticas, ciencias naturales, lenguaje y lenguas extranjeras 2002-2011*. México: ANUIES-COMIE.
- Berland, L. K. & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26-55.
- Borghì, De Ambrosio & Ghisolfi, Teaching special relativity in high school in *The Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics, Misconceptions Trust: Ithaca, NY* (1993).
- Bricker, L. A. & Bell, P. (2008). Conceptualizations of argumentation from science studies and the learning sciences and their implications for the practices of science education. *Science Education*, 92(3), 473-498.
- Burgh, G., & Nichols, K. (2012). The parallels between philosophical inquiry and scientific inquiry: Implications for science education. *Educational Philosophy and Theory*, 44(10), 1045-1059.
- Chion, A. F. R., Meinardi, E. & Adúriz-Bravo, A. (2014). La argumentación científica escolar: contribución a la comprensión de un modelo complejo de salud y enfermedad. *Ciência & Educação* (Bauru), 20(4).
- Coll, R. and Lajjium, D. (2011). Modeling and the future of science learning. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), *Models and Modeling* (pp. 3-22). Dordrecht: Springer.
- Dimitriadi, K., & Halkia, K. (2012). Secondary students' understanding of basic ideas of special relativity. *International Journal of Science Education*, 34(16), 2565-2582.
- Driver, R. y Oldham, V. (1998). Un enfoque constructivista del desarrollo curricular en ciencias. En R. Porlán, E. García y P. Cañal (Comps.), *Constructivismo y Enseñanza de las Ciencias* (pp. 113-131). Sevilla: Diada Editorial.
- Driver, R., Newton, P. & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84(3), 287-312.
- Duschl, R. A. (1990). *Restructuring science education: The importance of theories and their development*. Teachers College Press.



- Erduran, S., Simon, S. & Osborne, J. (2004). TAPping into argumentation: Developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. *Science education*, 88(6), 915-933.
- Etxebarría, U., (2000). Enseñanza e investigación. La relatividad especial en el sistema universitario alemán, 1906-1917. *LLULL*, 23 (48), 577-597.
- Ferraro, R. (2007). *Einstein's space-time: an introduction to special and general relativity*. Springer Science & Business Media.
- Facultad de Ciencias UNAM. (s.f. a). Mapa Curricular Física. [en línea] disponible en: <http://www.fciencias.unam.mx/licenciatura/mapa/106/1081> [consultado el 4 oct. 2016].
- Facultad de Ciencias UNAM. (s.f. b). Temario de Mecánica Vectorial. [en línea] disponible en: <http://www.fciencias.unam.mx/asignaturas/228.pdf> [consultado el 4 oct. 2016].
- Facultad de Ciencias UNAM. (s.f. c). Temario de Laboratorio de Mecánica. [en línea] disponible en: <http://www.fciencias.unam.mx/asignaturas/227.pdf> [consultado el 4 oct. 2016].
- Facultad de Ciencias UNAM. (s.f. c). Temario de Electromagnetismo I. [en línea] disponible en: <http://www.fciencias.unam.mx/asignaturas/419.pdf> [consultado 4 oct. 2016].
- Freire, P. (1994). *Cartas a quien pretende enseñar*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Frigg, R. & Hartmann, S. (2006). Scientific Models. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 740-749). New York: Routledge.
- Giere, R. (1988). *Explaining science, a cognitive approach*. Chicago: The university of Chicago Press.
- Gilbert J. K., Boulter., C. & Elmer, R.(2012). Positioning models in science education and in design and technology education. In J. K. Gilbert & C. Boulter (Eds.), *Developing models in science education*. Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Gil, D. (1994). ¿Qué hemos de saber y saber hacer los profesores de ciencias? (intento de síntesis de las aportaciones de la investigación didáctica), *Enseñanza de las Ciencias*, 9 (1), 69-77.
- Gil, D., Carrascosa J. y Martínez F. (2000). Una disciplina emergente y un campo específico de investigación. En F. Perales y P. Cañal (Coords.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pp.11-34). España: Editorial Marfil.

- Gil & Solbes (1993) The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, *International Journal of Science Education*, 15:3, 255-260
- Glick, T. F. (1987). Cultural issues in the reception of relativity. En: Glick, T. F. (Ed.), *The comparative reception of relativity* (pp. 381 -400). Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Grotzer, T. & Mittlefehldt, S. (2012). The role of metacognition in students' understanding and transfer of explanatory structures in science. In A. Zohar, Y. J. Dori (Eds.), *Metacognition in science education* (pp. 79-100). New York: Springer.
- Guisasola, J., Solbes, J., Barragues J. I., Morentin M., & Moreno, A. (2009). Students' Understanding of the Special Theory of Relativity and Design for a Guided Visit to a Science Museum, *International Journal of Science Education*, 31(15), 2085-2104, DOI: 10.1080/09500690802353536
- Gutiérrez, R. (2014). Lo que los profesores de ciencias conocen y necesitan conocer acerca de los modelos: aproximaciones y alternativas. *Bio-grafia*, 7(13), 37-66.
- Herscovitz, O., Kaberman, Z., Saar, L. & Dori, Y. (2012). The relationship between metacognition and the ability to pose questions. In A. Zohar, Y. J. Dori (Eds.), *Metacognition in science education* (pp. 165-195). New York: Springer.
- Hewson, P. (1982). A Case Study of Conceptual Change in Special Relativity: The Influence of Prior Knowledge in Learning. *European Journal of Science Education*, 4(1), 61-78.
- Hughes, R. I. G. (1997), "Models and Representation," *Philosophy of Science* 64 (Proceedings): S325-S336.
- Izquierdo-Aymerich, M., Espinet, M., García, M. P., Pujol, R. M. y Sanmartí, N. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 45-59.
- Izquierdo-Aymerich, M., & Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science & Education*, 12(1), 27-43.
- Jiménez-Aleixandre, M. (2007). Designing argumentation learning environments. In S. Erduran, M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education* (pp. 91-116). New York: Springer.
- Jiménez-Aleixandre, M. & Erduran, S. (2007). Argumentation in science education. In S. Erduran,

- ran, M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education* (pp. 3-28). New York: Springer.
- Jorba, J. y Sanmartí, N. (1993). *La función pedagógica de la evaluación*. *Aula de Innovación Educativa*, 20, p.20-30.
- Justi, R. & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' view on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369–387.
- Ladyshevsky, R. K. (2006). Peer coaching: a constructivist methodology for enhancing critical thinking in postgraduate business education. *Higher Education Research & Development*, 25(1), 67-84.
- Larkin, S. (2006). Collaborative group work and individual development of metacognition in the early years. *Research in Science Education*, 36(1-2), 7-27.
- Leplin, J. (2006). Realism. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 686-696). New York: Routledge.
- Lijnse, P. & Klaassen, K. (2000). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? En K. Kortland & K. Klaassen (Eds.), *Designing Theory-Based Teaching-Learning Sequences for Science Education. Proceedings of the symposium in honour of Piet Lijnse at the time of his retirement as Professor of Physics Didactics at Utrecht University* (pp. 157- 174). Utrecht: Fisme series.
- Lipman, M. (2003). *Thinking in education*. New York: Cambridge University Press.
- Lipson, A., Lipson, S. G., & Lipson, H. (2010). *Optical physics*. New York: Cambridge University Press. (Capítulo)
- Lloyd, E. (2006). Theories. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 822-828). New York: Routledge.
- López-Mota, A., & Waldegg, G. (2002). La didáctica de las ciencias como campo de estudio. G. Waldegg et al, 139-155.
- López-Mota, A., Rodríguez Pineda, D. P., Reyes Cárdenas, F., Flores López, M., Martínez Mocte-

- zuma, T. y López Becerra, C. (2012). Dos Líneas de Investigación para el Diseño de Estrategias Didácticas en la Educación en Ciencias: Cambio Conceptual y Modelización. Balance. En Libro *Memorias III Congreso Internacional y VIII Nacional de Investigación en Educación, Pedagogía y Formación Docente* (pp. 2147 – 2160). Bogotá: ASCOFADE-Universidad de Antioquia-Universidad Distrital Francisco José de Caldas-Universidad Del Valle-Universidad Pedagógica Nacional-Universidad Pedagógica Nacional de México. ISBN: 978-958-8650-30-2.
- López-Mota, A. D. y Rodríguez-Pineda D. P. (2013). Anclaje de los modelos y la modelización científica en estrategias didácticas. *IX Congreso Internacional Sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias*, 2008-2013.
- Lorenzo, A. y Martínez, M. (2001). *Asambleas y reuniones*. Metodologías de autoorganización. Torrecedeira: Traficantes de Sueños.
- Machamer, P. (2008). A Brief Historical Introduction to the Philosophy of Science. En P. Machamer & M. Silberstein (Eds.), *The Blackwell guide to the philosophy of science* (Vol. 19). (pp. 1-17). Great Britain: John Wiley & Sons.
- Malykin, G. B. (2000). The Sagnac effect: correct and incorrect explanations. *Physics-USpekhi*, 43(12), 1229-1252.
- Matthews, M. R. (1997). Introductory comments on philosophy and constructivism in science education. *Science & Education*, 6(1-2), 5-14.
- Monton, B. and Mohler, C. "Constructive Empiricism", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), [en línea] disponible en: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/constructive-empiricism/> .
- Osborne, J., Erduran, S. & Simon, S. (2004). Enhancing the quality of argumentation in school science. *Journal of research in science teaching*, 41(10), 994-1020.
- Pérez, R. (2016 a). El espacio y el tiempo en el tiempo [recurso electrónico]. México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. [en línea] disponible en: <http://www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/456/?el-espacio-y-el-tiempo-en-el-tiempo>.
- Pérez, R. (2016 b). El péndulo: un clásico que no pasa de moda. . [recurso electrónico]. México:

- Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. [en línea] disponible en:  
<http://www.cienciorama.unam.mx/#!autor/077/?ricardo-perez>.
- Pérez, R. (2016 c). Amasando la masa: de Pisa a las pizzas. [recurso electrónico]. México: Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM. [en línea] disponible en:  
<http://www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/492/?amasando-la-masa-de-pisa-a-las-pizzas>.
- Pfeifer, J. & Sarkar, S. (2006). The philosophy of science: an introduction. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. xi-xxvi). New York: Routledge.
- Pietrocola, M. & Zylbersztajn, A. (1999). The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. *International Journal of Science Education*, 21(3), 261-276.
- Pirie, S., & Kieren, T. (1992). Creating constructivist environments and constructing creative mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 23(5), 505-528.
- Posner, Strike, Hewson and Gertzog (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Ramos, M. (2006). The Reception of Relativity in Mexico. *Synthesis Philosophica*, 21 (2), 299-304.
- Rahaman, F. (2014). *The special theory of relativity: a mathematical approach*. Springer.
- Revel, A. y Adúriz-Bravo, A. (2014). La argumentación científica escolar. Contribuciones a una alfabetización de calidad. *Pensamiento Americano*, 7(13), 113-122.
- Rodríguez, D. P., Izquierdo, M. y López, D. M. (2011). ¿Por qué y para qué enseñar ciencias? En A. D. López-Mota y M. T. Guerra (Coords.), *Las ciencias naturales en educación básica: formación de ciudadanos para el siglo XXI* (pp. 7-33). México: SEP.
- Rodríguez Pineda, D.P., López y Mota, A.D., López, Becerra, C. y Flores López, M.L. (2013). El campo de Educación en Ciencias: una mirada desde la UPN. *Revista Entre Maestr@s*, 13 (46), 60-67.
- Sampson, V. & Clark, D. (2009). The impact of collaboration on the outcomes of scientific argumentation. *Science Education*, 93(3), 448-484.
- Sanmartí, N. (2000). El diseño de unidades didácticas. En F. J. Perales, P. Cañal (Eds.), *Didáctica de*

- las Ciencias Experimentales, Teoría y práctica de la Enseñanza de las Ciencias. (pp. 239-265). España: Marfil.
- Sanmartí, N. Márquez, C. y García, P. (2002). Los trabajos prácticos, punto de partida para aprender ciencias. *Aula Innovación Educativa* , 113, 8-14.
- Sanmartí, N. (2007). *10 ideas clave, evaluar para aprender*. España: Grao.
- Schraw, G., Crippen, K. J., & Hartley, K. (2006). Promoting self-regulation in science education: Metacognition as part of a broader perspective on learning. *Research in Science Education*, 36(1-2), 111-139.
- Scherr, R., Shaffer, P. & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, 69(7), 24-35.
- Scherr, R., Shaffer, P. & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238-1248.
- Scherr, R. (2007). Modeling student thinking: An example from special relativity. *American Journal of Physics*, 75(3), 272-280.
- Selçuk Sezgin, G. (2011). Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity. *European Journal of Physics*, 32, 1-13.
- Toledo, B., Arriasecq, I. y Santos, G. (1997). Análisis de la transición de la física clásica a la relativista desde la perspectiva del «cambio conceptual». *Enseñanza de las Ciencias*, 15(1), 79-90.
- Van Fraassen, Bas C. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford University Press.
- Veenman, M. V., Van Hout-Wolters, B. H., & Afflerbach, P. (2006). Metacognition and learning: Conceptual and methodological considerations. *Metacognition and learning*, 1(1), 3-14.
- Villani, A. & Pacca, L. A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1), 55-66
- Villani, A. & Pacca, L. A. (1990). Spontaneous reasoning of graduate students. *International Journal of Science Education*, 12(5), 589-600.
- White, B., Frederiksen, J. & Collins, A. (2009). The interplay of scientific inquiry and metacognition.

In D. Hacker, J. Dunlosky & A. Graesser (Eds.), *Handbook of metacognition in education* (pp. 173-205). New York: Routledge.

# Anexo 1: Instrumentos

## Primera sesión

En el cuadro (4.2) se muestran las actividades a realizar en la primera sesión de la ED, en este apéndice se expondrán los instrumentos a utilizar en la actividad A3, que consiste en recabar las ideas de los alumnos acerca de lo que son los modelos y sobre su construcción en las ciencias, particularmente en física. El instrumento para llevar a cabo dicha actividad es un cuestionario abierto, ver cuadro (A1.1), que se basa en el contenido disciplinar del laboratorio de mecánica (ver sección 3.4.1.) sobre los modelos, su construcción, rango de validez y su confrontación con las evidencias experimentales.

## Segunda sesión

En la segunda sesión se llevarán a cabo tres actividades, de las cuales sólo dos (B2 y B3) servirán para recabar datos que luego serán analizados. En la **actividad B2** se hará una discusión grupal para analizar el fenómeno de la simultaneidad desde el punto de vista de la mecánica clásica, lo anterior se registrará con una grabación de audio que posteriormente se transcribirá, para poder analizar las aportaciones de los estudiantes. El análisis se hará tomando como referente las categorías del cuadro (A1.2).

Para la **actividad B3** se plantea como primer momento una exposición por parte del docente y posteriormente se propicia una discusión grupal para analizar el principio de la relatividad (sección 3.1.1.2) y el primer postulado de la TRE (sección 3.1.2.2). El análisis de dichas discusiones se hará considerando las categorías del cuadro (A1.3).

También se hará el análisis del uso de la argumentación y la metacognición en las discusio-



nes grupales durante la sesión, para ello se utilizarán como categorías de análisis los aspectos que resumen a dichas componentes, mostradas en los cuadros (2.3) y (2.2) respectivamente, y que son aspectos necesarios para el proceso de modelización de los alumnos.

### **Tercera sesión**

La tercera sesión comienza con la aplicación de un pequeño cuestionario (**actividad C1**) que se les proporcionará a los alumnos (ver cuadro (A1.4)), con la intención de que autoevalúen su desempeño al responderlo, respecto al uso de la argumentación y la metacognición. Una vez concluido el cuestionario se preguntará a los estudiantes si tienen dudas de lo visto en la sesión anterior y se hará una recapitulación para reforzarlo.

En la segunda actividad de la tercera sesión (**C2**) se discutirá con los estudiantes, de forma grupal, las posibilidades para sortear las inconsistencias entre las transformaciones de Galileo y las leyes del electromagnetismo. El profesor guiará la discusión para abordar y discutir el segundo postulado de la TRE y las consecuencias del mismo, los datos que se recaben en esta actividad provendrán de la discusión desarrollada con los alumnos y las categorías de análisis son las que se muestran en el cuadro (A1.4).

En la última actividad (C5) de la sesión se planea construir de forma grupal el MCEA del fenómeno de la simultaneidad y el proceso se registrará por medio de una grabación en audio para analizarla al finalizar la sesión, utilizando las categorías de análisis que se muestran en el cuadro (A1.5).

### **Cuarta sesión**

Las actividades D5 y D6 de esta sesión se harán por medio de discusiones grupales y el análisis de ellas se hará en términos de las categorías de análisis que se muestran en el cuadro (A1.6).

Cuadro A1.1: Cuestionario para recabar las ideas de los alumnos acerca de los modelos.

Pregunta	Propósito de la pregunta
¿En el ámbito de la física, explica que entiendes o sabes acerca de los que es un modelo?	Determinar de forma general la idea que tienen los alumnos sobre los modelos
Menciona aquello que compone a un modelo	Esta pregunta esta pensada para saber los elementos de un modelo, que los alumnos conocen
Da al menos tres ejemplos de modelos usados en la física y especifica que se desea explicar con ellos	Se desea determinar si los alumnos asocian los modelos con algún fenómeno natural
¿Para qué sirven los modelos y menciona las posibles limitaciones que estos tengan?	Determinar las ideas de los alumnos acerca de los propósitos por los que se utilizan los modelos y también su rango de validez, o bien las condiciones bajo las que se pueden emplear
¿Qué papel crees que tengan los modelos en la ciencia?	conocer las ideas de los estudiantes acerca de la importancia de los modelos para el conocimiento científico

Cuadro de construcción propia.

Cuadro A1.2: C.

categorias de análisis
Sistemas de referencia inerciales
Observadores y eventos
Transformaciones de Galileo

Cuadro de construcción propia.

Cuadro A1.3: C.

categorias de análisis
Luz
Principio de relatividad
Primer postulado de la TRE

Cuadro de construcción propia.

Cuadro A1.4: C.

Pregunta	Propósito de la pregunta
¿Cómo consideras que ha sido el uso de la argumentación en clase tanto de forma individual como grupal?	Se desea que los alumnos evalúen el uso que han hecho de la argumentación durante las sesiones
Si consideras que la metacognición es de utilidad proporciona argumentos a favor de ella con base en tu experiencia personal al utilizarla. O bien si piensas que no es útil, menciona las razones que tengas al respecto	recabar datos acerca de como los estudiantes se involucran con la práctica de la metacognición, o bien las razones que les hacen pensar que no es útil

Cuadro de construcción propia.

Cuadro A1.5: C.

categorias de análisis
Sistemas de referencia inerciales
Observadores
Luz

Cuadro de construcción propia.

**Cuadro A1.6 C.**

<b>categorías de análisis</b>
Sistemas de referencia inerciales
Observadores
Eventos
Luz
Primer postulado de la TRE
Segundo postulado de la TRE
Dilatación del tiempo
Contracción de la longitud
Simultaneidad relativa

Cuadro de construcción propia.

**Cuadro A1.7: C.**

<b>categorías de análisis</b>
Sistemas de referencia inerciales
Sistemas de referencia no inerciales
Observadores
Eventos
Luz
Primer postulado de la TRE
Segundo postulado de la TRE
Simultaneidad relativa.

Cuadro de construcción propia.

## Anexo 2: Guía para desarrollar las discusiones de clase

En la sección 2.2 se mencionó que para desarrollar la argumentación y los procesos de metacognición con los alumnos es recomendable utilizar discusiones grupales (Anderson, Nashon y Thomas, 2009, Grotzer, y Mittlefehldt, 2012) junto con el empleo de un diálogo socrático en el aula (Grotzer, y Mittlefehldt, 2012). Ante esto es necesario diseñar un instrumento que sirva de guía para poder llevar a la práctica lo anterior, por lo cual se retomará la propuesta de Burgh y Nichols (2012) basada en *comunidades de indagación*, dichos autores señalan como parte fundamental de la enseñanza en ciencias el involucrar a los estudiantes con las prácticas y normas de la comunidad científica, además de desarrollar hábitos de autoevaluación para practicar estas normas al enfrentar situaciones nuevas dentro del ámbito de la ciencia o bien de la educación en ciencias.

El enfoque que retoman Burgh y Nichols (2012) está basado en la idea de Pierce sobre las 'comunidades de indagación' que tienen como base a las comunidades científicas ancladas en una disciplina, las cuales tienen como propósito la construcción de conocimiento científico. Dentro de este enfoque se considera que se debe fomentar a los alumnos para que desarrollen habilidades que les permitan apropiarse de las prácticas de la comunidad científica. Burgh y Nichols (2012) también mencionan que la enseñanza en ciencias con este enfoque tiene fundamentos de la filosofía educativa de Dewey que propugna el aprendizaje mediante la acción y la reflexión, proceso en el que se prioriza la comprensión, interpretación, la representación y

el determinar el significado de las cosas (en nuestro caso los fenómenos físicos). Los mismos autores apuntan que para construir significados en la ciencia, se requiere que los alumnos se involucren con el uso de representaciones especializadas que permiten el acceso a explicaciones teóricas más completas que de otro modo no se tendrían; ejemplo de ello son las representaciones matemáticas, el uso de gráficas, simulaciones numéricas, etc. Con estas representaciones el conocimiento científico se construye y se modifica a través del diálogo colaborativo, donde es central el uso racional de las metodologías de la ciencia, sujetas a estándares de la propia comunidad científica; por ejemplo los científicos continuamente reconfiguran el conocimiento científico, ya que este es falible, razón por la cual la comunidad debe estar abierta a nuevas ideas, a la revisión continua y sobre todo a la autocorrección. Cabe mencionar que el grado de control de las prácticas antes mencionadas aseguran en conjunto que la calidad del conocimiento producido sea buena.

Por otro lado según Burgh y Nichols (2012) Lipman hace una distinción respecto al término de 'comunidades de indagación'. En primer lugar se refiere a ellas en un sentido estricto como un método de enseñanza dividido en cinco etapas: **(1)** ofrecer un texto o presentar una situación detonante, con la finalidad de que los estudiantes reflexionen acerca de algún asunto y expresen preguntas y opiniones al respecto; **(2)** elaboración de la agenda junto con los alumnos para desarrollar en clase, lo anterior puede consistir en elaborar una pregunta central que se intentará contestar de forma colectiva por medio de la exploración de ideas, generación de hipótesis y conjeturas para explicar la situación problemática utilizando argumentos; **(3)** consolidar la comunidad de indagación propiciando un clima de solidaridad, donde los integrantes comprendan lo que se discute y no se excluyan por no asimilarlo; **(4)** el profesor debe promover el diálogo y la discusión a través del uso de preguntas abiertas y la introducción de ejercicios; **(5)** alentar a los alumnos a responder sus preguntas y resolver sus dudas, después del proceso de indagación el grupo evaluará sus conclusiones y se terminará la deliberación (Lipman, 2003).

Lipman también se refiere a las *comunidades de aprendizaje* en un sentido amplio como un *espacio pedagógico* donde los estudiantes transitan entre la comunidad de indagación en el aula

a la comunidad de indagación basada en la disciplina, de la cual forman parte los científicos' (Burgh y Nichols, 2012, p. 1050).

Dentro de los aspectos que menciona Lipman (2003) sobre las comunidades de indagación está el hecho de que éstas tienen un propósito y mediante algún proceso se obtiene al final un producto (en nuestro caso la construcción de modelos), además el proceso tiene un sentido de dirección y se desarrolla por medio de un diálogo, el cual se caracteriza por presentar desequilibrios que obligan a explorar, investigar e indagar junto con los interlocutores haciendo uso de la lógica para utilizar argumentos. Otro de los aspectos a destacar de las 'comunidades de indagación' es el hecho de que sirven para elevar la eficiencia del proceso de aprendizaje ya que los estudiantes en vez de aprender todo por ellos mismos se pueden beneficiar de la experiencia de otros.

Entre las características que es importante promover en una comunidad de indagación está la inclusión porque todos participen como iguales, incluido el profesor, involucrar a toda la comunidad en las actividades, hacer preguntas, inferir, suponer, imaginar, buscar significado a las cosas, entre otras. Como parte de la dinámica en la comunidad debe estar presente la deliberación, para evaluar las posibles explicaciones a un fenómeno, por medio de la evaluación racional y reflexiva de argumentos, lo cual además establece un desafío para los participantes y mejora sus habilidades de pensamiento, ya que para usar sus mejores razonamientos deben emplear su conocimiento y a su vez los participantes son evaluados por sus pares y el profesor. Uno de los elementos centrales dentro de las comunidades de indagación es la elaboración de preguntas, las cuales presentan una oportunidad para comenzar el diálogo, la autocrítica, la autocorrección y evaluación crítica, además hace que los estudiantes se habitúen a permanecer en un estado de duda que los induzca a seguir indagando (Lipman, 2003).

En la Estrategia Didáctica (ED) diseñada en la sección 4 se ocupará la conceptualización de las 'comunidades de indagación' y particularmente se considerarán elementos del sentido estricto que Lipman (2003) menciona, adecuando las etapas antes mencionadas a la ED de este trabajo. Debe señalarse que las etapas consideradas para formar una 'comunidad de indagación'

no se tienen que traslapar con el diseño de la ED completa, sino que se deben llevar a cabo en cada sesión de la ED para lograr que se reproduzcan las características antes mencionadas, que dicho sea de paso están en concordancia con lo que se planteó en la sección 2.2.2 sobre metacognición y argumentación y con lo expuesto en la sección 2.3 donde se describe el diseño de la ED y se discute sobre el papel de la evaluación en todo el proceso.

## **Anexo 3: Consideraciones para el buen manejo de grupo**

El diseño de las actividades de la Estrategia Didáctica (ver sección 4) debe contemplar elementos para el manejo de grupo, que propicien y ayuden a generar las condiciones para desarrollar la metacognición y el uso de la argumentación (expuestas en la sección 2.2.2), así como para implementar las discusiones en clase (Apéndice B). Por lo anterior se considerarán algunos elementos tratados por Lorenzo y Martínez (2001), los cuales se exponen a continuación.

Lorenzo y Martínez (2001) mencionan que al trabajar con grupos, el encargado de conducir las actividades debe tener nociones técnicas para que los objetivos se logren con éxito, lo anterior se propicia aún más si dichas nociones también las comparten los participantes, ya que son ellos los principales actores. Los mismos autores especifican tres aspectos a considerar en el trabajo con grupos: (1) eficacia de la reunión, es decir la consecución de los objetivos -cubrir el contenido planeado, en el tiempo establecido, cuidando que éste sea tratado con claridad para que sea entendido y a partir de ello los alumnos puedan hacer sus propias construcciones-; (2) participación democrática, para fomentar la expresión y participación de todos los actores; (3) y que las interacciones en el grupo sean cordiales y cooperativas.

Habrá que tener en consideración que existe la posibilidad de no completar totalmente los objetivos en los tres aspectos antes mencionados; por ejemplo al dar clases siempre se tiene el problema de contar con tiempo limitado para cubrir cierto contenido, lo cual en ocasiones puede impedir que absolutamente todos los miembros de un grupo expresen todas sus opiniones sobre



algún asunto específico, con lo cual se presenta cierta incompatibilidad entre el primer aspecto y el segundo antes mencionado; por lo anterior Lorenzo y Martínez (2001) proponen establecer resultados mínimos y determinar los aspectos prioritarios a cumplir, además discuten varias opciones para anticiparse a los problemas que se presenten al trabajar con grupos, entre ellas se encuentra la planificación para evitar improvisar con el grupo, evitar la falta de claridad y por tanto comprensión de lo que se aborde.

Para poder anticipar los problemas que impidan cumplir en su totalidad los objetivos fijados para el trabajo con un grupo, Lorenzo y Martínez (2001) consideran necesario tomar en cuenta cuatro aspectos centrales, que se describen a continuación. En primer lugar, las clases tienen un tiempo de duración bien establecido, el cual lo conocen tanto el docente como los estudiantes; ante esto el docente debe planear sus clases haciendo una estimación del tiempo que tomará realizar cada una de las actividades previstas, en este sentido es útil, para hacer más eficiente el trabajo con el grupo, abordar los temas complejos por partes y planear su resolución gradualmente, esto generará una sensación de avance y servirá de motivación para los participantes. Otro de los aspectos que influyen es el número de individuos que conforman el grupo, Lorenzo y Martínez (2001) mencionan que con un grupo de entre cinco y diez individuos se consiguen mejores resultados durante un proceso de argumentación, además señalan que con este número de personas se dinamiza el trabajo y se hace más eficiente el uso del tiempo; por otro lado los grupos pequeños son menos óptimos ya que los intercambios son menores, mientras que los grupos mayores a diez personas no tienen tanta participación y puede ser necesario subdividirlo en grupos más pequeños para que haya mayor intercambio. Por último se debe considerar la organización del espacio, elemento que repercute en la comunicación dentro del grupo, la disposición más adecuada para promover la participación de todos es sentando a las personas en círculo de modo que se puedan ver directamente, lo anterior servirá para evitar que se formen subgrupos que entorpezcan el trabajo en clase.

Por último, se debe considerar el papel de la persona que dirija las actividades del grupo. En este caso el docente es quien debe facilitar las condiciones para que se alcancen los objeti-

vos, mediante el control de las actividades, la aplicación de elementos que hagan dinámico al grupo -sugiriendo preguntas, planificando las actividades, organización del espacio, orientando al grupo, etc.-, la planificación organizativa, además de contar con cierto dominio técnico para conducir el trabajo conjunto, entre otras. Debe señalarse la necesidad de que los participantes compartan la responsabilidad junto con el docente para que sea posible lo anterior, ya que de la aportación de cada uno de ellos se hacen posibles las condiciones que permiten obtener buenos resultados, en el tiempo establecido.