

Análisis conceptual del espacio-tiempo como elemento para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad

Laura Stefany Pardo Ariza

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de ciencia y tecnología

Licenciatura en física

Bogotá D.C

2021

Análisis conceptual del espacio-tiempo como elemento para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad

Laura Stefany Pardo Ariza

Asesor

Juan Carlos Castillo Ayala

Monografía para optar al título de Licenciada en Física

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de ciencia y tecnología

Licenciatura en física

Línea de profundización:

La enseñanza de la física desde una perspectiva cultural

Bogotá D.C

2021

Dedicatoria

A mi hijo Juan, quien es la persona que alegra mi corazón.

Agradecimientos

A mis papás Mercedes y Héctor por creer en lo que hago, por sus consejos y cariño.

A mis dos compañeras Laura y Paula, con las que inicié este camino, y a quienes considero mis hermanas, agradezco infinitamente el apoyo que nos hemos dado durante estos años.

A la universidad pedagógica nacional, que nos brinda un espacio para crecer y creer que será posible hacer de esta profesión un medio para transformar y luchar.

A mí, por la paciencia y por impulsar constantemente esta idea.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS DEL TRABAJO	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
1.4. Antecedentes	7
1.4.1. Reflexiones teóricas.....	8
1.4.2. Reflexiones en torno a la enseñanza.....	9
1.4.3. Reflexiones de orden metodológico	10
2. SOBRE LAS DISCUSIONES FILOSÓFICAS.....	12
2.1. Espacio y tiempo bajo la mirada de Hume.....	13
2.1.1. Noción de infinito en los conceptos de espacio y tiempo.....	14
2.1.2. Espacio	14
2.1.3. Tiempo.....	15
2.2. Espacio y tiempo bajo la mirada de Mach	16
2.2.1. Tiempo.....	16
2.2.2. Espacio	17
2.3. La filosofía en la TER según Moritz Schlick.....	20
2.3.1. La filosofía en la física	20
2.3.2. Algunas menciones históricas	21
2.3.3. Construcción de los conceptos por definición.....	22
2.3.4. Sistemas de coordenadas y transformaciones.....	23
2.3.5. Espacio y tiempo	24
3. SOBRE LAS DISCUSIONES FÍSICAS.....	25
3.1. Las bases de la TER	25
3.1.1. Sobre el principio de causalidad y las leyes físicas	26

3.1.2. El tiempo como medida: la simultaneidad	28
3.1.3. El espacio como medida: reglas fijas	30
3.1.4. Marco de referencia y equivalencia entre marcos	31
3.1.5. Consolidación del concepto espacio-tiempo	34
3.1.6. Consecuencias de la TER	34
4. SOBRE LAS DISCUSIONES PEDAGÓGICAS	36
4.1. La importancia de los estudios histórico- filosóficos para la enseñanza de las ciencias 36	
4.2. La recontextualización de saberes	39
5. CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es un análisis de corte conceptual del concepto espacio-tiempo, en donde se abordan factores de orden filosófico, histórico, físico y pedagógico, que permitirán llegar a distintas reflexiones sobre la enseñanza de la relatividad. Este estudio surge a partir de lo evidenciado durante la tercera práctica pedagógica de la línea “enseñanza de la física desde una perspectiva cultural”, en el colegio OEA, ya que allí se observó como la Teoría Especial de la Relatividad pierde importancia y reconocimiento en la educación básica secundaria. Así pues, el propósito del presente trabajo es brindar herramientas que permitan la reflexión y contextualización de la teoría especial de la relatividad para su enseñanza en diferentes contextos académicos. En este sentido el trabajo se divide en cuatro capítulos.

En el primer capítulo, se introduce el planteamiento del problema, exponiéndose aquí los objetivos en la educación y la deficiencia que hay en el ámbito educativo con respecto a la omisión de la enseñanza de la física moderna. A partir de esto, se plantean los objetivos que servirán de guía heurística para el desarrollo del trabajo, y además se exponen los referentes que sustentan la importancia de la presente investigación.

En el segundo capítulo se presentan las discusiones filosóficas abordadas en diferentes momentos históricos, con respecto a los términos de espacio y tiempo. Para esto se considera los planteamientos de dos grandes autores, David Hume y Ernst Mach, quienes fueron reconocidos por Albert Einstein como sus fuentes filosóficas, ya que le permitieron replantear los conceptos propios de la mecánica newtoniana. Así mismo, se considera el trabajo presentado por Moritz Schlick, primer autor en realizar un análisis filosófico de la teoría de la relatividad; esto último con el fin de evidenciar la relación entre la filosofía y la física.

En el tercer capítulo se analizan los planteamientos de Einstein, a través del documento “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” y demás publicaciones como “Notas autobiográficas” y “Sobre la teoría especial de la relatividad especial y general” donde hace referencia a las consideraciones hechas, las cuales le permitieron la consolidación de la teoría especial de la relatividad.

En el último capítulo se presentan las discusiones pedagógicas, y se expone la importancia de los estudios histórico-filosóficos para la enseñanza de las ciencias, siendo estos aspectos claves para el entendimiento significativo de la física.

1. FUNDAMENTOS DEL TRABAJO

1.1. Planteamiento del problema

Los Estándares Básicos de Competencias propuestos por el Ministerio de Educación Nacional exponen la necesidad de la enseñanza en ciencias, puesto que la ciencia y la tecnología tienen un papel fundamental en el desarrollo de la sociedad, se requiere entonces, ciudadanos capaces de analizar, debatir, participar y tomar decisiones que favorezcan a su entorno social y natural; así, la enseñanza de las ciencias en la escuela tiene un rol indispensable porque permite que el estudiante desarrolle un pensamiento elaborado y crítico frente a las situaciones sociales y fenómenos físicos que lo rodea.

Para lograr los objetivos propuestos en los estándares básicos la formación en ciencias naturales en la escuela está dividida en tres grandes componentes: físico, químico y biológico. El componente físico que se lleva a cabo en educación media está enfocado en la enseñanza de conceptos y teóricas clásicas, Mecánica, Termodinámica, Mecánica de fluidos, y Electromagnetismo, es decir, la física desarrollada hasta finales del siglo XIX. Los desarrollos posteriores en la física, principalmente en el siglo XX, lo que se considera Física moderna, tuvo un gran impacto en el pensamiento humano y en las tecnologías actuales. Paradójicamente a pesar de la importancia que tienen estas teorías modernas de la física para el desarrollo tecnológico, social y para el pensamiento actual del mundo, éstas no están contempladas en los estándares básicos de ciencias naturales.

El desarrollo de la teoría de la relatividad y el comienzo de la mecánica cuántica introducen nuevas formas de entender el mundo. Einstein (1905) publicó su artículo Sobre la electrodinámica de los cuerpos movimiento, trabajo en el cual expone las bases de la teoría especial de la relatividad, poniendo de presente los problemas teóricos que implican la necesidad de esta nueva teoría en la física, esto es, las asimetrías que se encuentran al aplicar la electrodinámica de Maxwell a cuerpos en movimiento, además realiza una crítica al concepto del éter.

Sin embargo, estos problemas teóricos, que surgen de la física clásica, no suelen presentarse en la enseñanza de la relatividad, particularmente en la educación media y tampoco existen propuestas para el reconocimiento de estos problemas teóricos, ya que en general la enseñanza de esta se centra particularmente en las transformaciones de Lorentz y en algunas

consecuencias de las mismas, tales como la contracción de longitud y dilatación del tiempo, de las cuales se hacen múltiples interpretaciones generalmente erróneas a la luz de la teoría especial de la relatividad, al no considerarse el contexto teórico que envuelve a la teoría.

Durante las practicas pedagógicas realizadas en el Colegio OEA con el grado 11° se implementó una unidad sobre la explicación de la relatividad especial con el fin de reconocer aquellas problemáticas que surgieron en las teorías clásicas y la necesidad de dar solución por medio de esta nueva teoría, sin embargo, al estudiar conceptos tales como: espacio y tiempo, se observó dificultades en la comprensión de estos conceptos por parte de los estudiantes, ya que, aunque son temáticas abordadas durante la secundaria y parecieran ser ideas intuitivas, no se pueden conceptualizar como se espera desde un punto de vista físico. Además, cuando se habla de estos conceptos solo se da razón de ellos a través de su medición y de su relación con otras ideas físicas.

Esto permite visualizar una problemática en la comprensión de conceptos, debido a que no se da el tiempo suficiente para una reflexión en torno a ellos; la enseñanza de la física en estos niveles escolares se centra en la solución de ejercicios mediante el uso de algunas ecuaciones, dejando de lado la comprensión de los fenómenos, problemáticas y conceptos fundamentales de las teorías físicas. Particularmente conceptos como el espacio y el tiempo, que revisten una cierta complejidad en las teorías físicas, se dejan simplemente como las ideas intuitivas propias de los estudiantes. Cuando se enseña mecánica clásica, no se hacen reflexiones de estos conceptos, ni de su relación con los principios físicos tales como las leyes de Newton, puesto que se supone que las definiciones de espacio y tiempo coinciden con las ideas intuitivas que tiene los estudiantes, y es por ello que, cuando estas ideas se llevan al contexto de la relatividad se hace más notorio el problema de comprensión del concepto espacio-tiempo.

Cuando pensamos en las ideas de espacio y tiempo, intuitivamente, están desligadas del movimiento, puesto que el movimiento es un suceso que le ocurre a los cuerpos y no afecta la naturaleza de estas dos ideas. Estas nociones intuitivas no suelen presentar dificultades para la comprensión de la mecánica clásica, pero si resultan problemáticas a la hora de comprender la teoría especial de la relatividad.

El espacio y el tiempo, en la teoría especial de la relatividad, son mediciones que se realizan sobre los cuerpos y sobre los eventos, cuyas características dependen del marco de referencia desde

el cual se haga dicha medición. Adicionalmente, a pesar de que las consecuencias como la contracción de longitudes y dilatación del tiempo, son contraintuitivas con las ideas que tienen los estudiantes acerca del espacio y tiempo, pueden ser comprensibles si se realiza una contextualización adecuada que permita definir el espacio-tiempo de la relatividad.

Como estudiantes de la licenciatura en física y de la línea de investigación *la enseñanza de la física desde una perspectiva cultural* sabemos que no solo es la formulación matemática y teórica lo que nos permite un acercamiento a los conceptos, que algunas veces en los libros se presentan mediante un desarrollo algorítmico complejo, sino también los aspectos filosóficos que están a la base de las teorías, los problemas de conocimiento y las concepciones sobre el mundo físico propias de los contextos en los cuales está inmerso el planteamiento y la construcción de las teorías físicas. Estas componentes nos permiten tener una comprensión profunda de dichos conceptos y teorías.

A partir de esto, surge la siguiente pregunta problema: ¿Mediante que consideraciones de orden físico, teórico y filosófico es posible la comprensión del concepto espacio-tiempo para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad?

1.2. Justificación

La física moderna, consolidada en la relatividad y la cuántica, actualmente son parte de la cultura, se encuentran presente y se hablan de estas dos grandes teorías en distintos espacios, medios de comunicación, redes sociales, películas, libros; actualmente es común escuchar hablar de agujeros negros, ondas gravitacionales, agujeros de gusano, entre otros; sin embargo, no existe una comprensión consiente de dichas teorías. Es importante entonces, tener un conocimiento básico y generar a su vez un juicio crítico o postura sobre ello.

La teoría especial de la relatividad, por ejemplo, no está contemplada en la educación básica secundaria, y en la formación universitaria no es abordada bajo reflexiones de orden conceptual, esto es, una construcción histórica y filosófica, además de teórica y matemática. De esta forma suele reducirse la teoría al entendimiento y desarrollo de ecuaciones y algoritmos matemáticos.

La ciencia en general no debe ser vista como algo ajeno a los estudiantes si no que se debe llevar a la vida diaria, siendo este el lugar en donde logra cobrar significado. La ciencia ha

cambiado y cambia constantemente, con ella cambia la forma de interpretar el mundo, por ello es necesario que en la educación se aborden dichos cambios.

En el siglo XX la física dio un salto en la forma de entender y explicar la naturaleza. Para el momento, existían dos problemas a los cuales se enfrentaban los físicos de la época. Uno de ellos relacionados a la acción física, en donde se establecía el éter como sistema de referencia absoluto, y otro en términos de la falta de simetría en la teoría electrodinámica de Maxwell, en relación con el principio de causalidad cuando esta teoría se aplicaba a cuerpos en movimiento. A partir de esta falta de simetría se pone a tela de juicio la validez de la mecánica Newtoniana, aunque esta hubiera sido muy exitosa en la explicación de una gran cantidad de fenómenos; adicionalmente la mecánica Newtoniana había estado siendo fuertemente cuestionada desde una perspectiva filosófica. (Einstein, Grünbaum, Eddington y otros, 1995).

Los desarrollos de Einstein en torno a estas dos problemáticas dieron como resultado dos principios fundamentales. Por un lado, Einstein (1905) afirmó que las leyes físicas eran las mismas, independientemente del sistema de referencia en el cual se realizara la medición del fenómeno; y por otro lado estableció la invarianza de la velocidad de la luz. Bajo estos dos principios establece la Teoría Especial de la Relatividad, teoría que trajo consigo una forma diferente de entender los fenómenos físicos.

Entonces, sí el surgimiento de la teoría especial de la relatividad en el siglo XX fue primordial para el desarrollo científico y pensamiento moderno, ¿Por qué la enseñanza de esta es omitida en la educación media y poco contextualizada en la formación universitaria? Esto podría atribuirse a la falta de textos o propuestas para enseñanza de la relatividad. Los libros para la enseñanza de esta o de divulgación científica tienen un desarrollo conceptual y matemático complejo, esto a su vez supone un desafío para el estudiante y para el docente.

¿Qué deberíamos enseñar primero? ¿Deberíamos enseñar la ley “correcta” pero poco familiar con sus extrañas y difíciles ideas conceptuales, por ejemplo, la teoría de la relatividad, el espacio-tiempo tetra dimensional y cosas similares? ¿o deberíamos enseñar primero la sencilla ley de la «masa constante», que es sólo aproximada, pero no implica ideas tan difíciles? (Feynman, 2014)

Bajo esta idea, se podría pensar y replantear la enseñanza de la física. La física, y la ciencia en general, usualmente es llevada a los contextos escolares como un producto terminado y no como una actividad científica envuelta en un contexto histórico, filosófico y cultural; Según Antonio Moreno González (2006) estas componentes deberían estar presentes en la formación primaria, secundaria y universitaria, para despertar el espíritu crítico y mejorar el entendimiento e interés por la ciencia.

Por ende, un estudio del concepto espacio-tiempo bajo las componentes filosóficas y teóricas propuestas en este trabajo, podría mejorar la receptividad de la Teoría Especial de la Relatividad por parte de los estudiantes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar un estudio acerca del concepto espacio-tiempo, mediante el análisis de algunas obras de Einstein y las influencias teóricas y filosóficas que tuvo para consolidar la teoría de la relatividad, con el fin de aportar elementos para la enseñanza de la Teoría Especial de la Relatividad.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Hacer una revisión de algunos documentos y textos de Albert Einstein donde se expongan las influencias teóricas y filosóficas que estuvieron en la base del planteamiento de la teoría especial de la relatividad, para conocer el contexto desde el cual se plantea dicha teoría.
- Realizar un análisis de la información obtenida de los referentes bibliográficos desde la perspectiva del análisis conceptual para generar una reflexión sobre el concepto de espacio-tiempo.
- Generar una reflexión de corte pedagógico, basada en el análisis del concepto espacio-tiempo, que permita establecer elementos para el planteamiento de propuestas en la enseñanza de la teoría especial de la relatividad.

1.4. Antecedentes

Debido a la naturaleza del trabajo, la búsqueda de antecedentes y recolección de información sobre los trabajos realizados anteriormente, que guardan relación con la temática, se

clasificaran en tres líneas de trabajo, por un lado, en términos de las reflexiones teóricas sobre los conceptos propios de la teoría especial de la relatividad; por otro lado, las reflexiones que abordan aspectos alrededor de la enseñanza de esta teoría; y para finalizar los antecedentes relativos al enfoque metodológico del trabajo.

1.4.1. Reflexiones teóricas

Dentro de los antecedentes de orden teórico, se encuentra el trabajo de grado “Análisis comparativo del concepto de espacio en la teoría clásica y relatividad especial” (Gordillo, 2018) el cual aporta en el reconocimiento de los cambios que se han desarrollado frente a la noción de espacio a partir de distintos autores; al ser conceptos abordados también desde una rama filosófica, se tiene en cuenta la ruptura conceptual en términos físicos, matemáticos y filosóficos; pasando de una postura clásica a una moderna. Es en esta transición conceptual donde se evidencia la importancia del reconocimiento de los cambios teóricos para el entendimiento significativo de la física.

En el trabajo de grado “Análisis de la falta de simetría del electromagnetismo clásico y su solución relativista: tensor de campo electromagnético” (Moreno y Barrera, 2016) se aborda falta de simetría de la teoría electromagnética de Maxwell cuando se consideran los cuerpos en movimiento y se lleva a cabo una discusión en torno a la solución que la teoría especial de la relatividad le da a esta falta de simetría. Esta discusión será tenida en cuenta en el desarrollo del tercer capítulo del presente trabajo, siendo allí donde se abordarán los planteamientos de orden físicos que utiliza Einstein para sentar las bases de la relatividad.

También se tiene en cuenta el trabajo de grado “Análisis introductorio para la comprensión del segundo postulado de la teoría especial de la relatividad” (Sierra, 2014) en donde a partir de este se logra sustentar las reflexiones de la justificación del presente trabajo, puesto que realiza un análisis a la forma en que los diferentes libros educativos, divulgativos e históricos abordan e introducen al lector a la Teoría Especial de la Relatividad y de este trabajo, la autora concluye que el planteamiento que se hace acerca de esta teoría y los postulados que la componen, en los textos anteriormente mencionados, terminan siendo simplemente enunciados que no poseen una justificación rigurosa.

Para finalizar esta línea teórica se encontró el trabajo de grado “Caracterización del Espacio-tiempo de Minkowski” (Vargas, 2009) en donde se reconoce, por medio de un análisis

epistemológico, el cambio de las concepciones clásicas a las posturas modernas de los conceptos espacio y tiempo, específicamente de dos autores, que serán tenidos en cuenta en el presente trabajo, Newton y Einstein. Adicional a esto realiza un análisis profundo a la geometría planteada por Minkowsky y la forma en la que esta permite una representación del espacio-tiempo.

1.4.2. Reflexiones en torno a la enseñanza

Dentro de los antecedentes que abordan aspectos para la enseñanza de la TER se encuentra “Las ecuaciones de Maxwell: una estrategia tecnológica para abordar fenómenos que relacionan la relatividad especial con el electromagnetismo” (Munévar 2019) trabajo en el cual se relaciona el electromagnetismo y la relatividad especial a través de las ecuaciones de Maxwell. A partir de este análisis se diseña un software para los estudiantes de la licenciatura en física con el fin de visualizar 3 fenómenos físicos distintos en diferentes marcos de referencia, es decir desde la teoría electromagnética y la teoría de la relatividad. Si bien, el presente trabajo no maneja una línea de investigación e implementación similar, sí lo sustenta exponiendo la importancia de generar propuestas que permitan la enseñanza y consecuentemente el entendimiento de la teoría especial de la relatividad.

En el artículo “Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física” (Pérez y Solbes, 2006) se expone la importancia de enseñar relatividad como elemento para la comprensión de la física clásica, ya que permite reconocer los límites de la validez de esta. De tal forma se evidencia el papel que jugó la teoría de la relatividad en la historia, siendo esta una de las teorías que daría paso a una nueva forma de entender los fenómenos físicos y de proponer nuevas explicaciones para estos, reflexiones que serán llevadas a cabo en el presente trabajo.

Dentro de esta misma línea, de la enseñanza de la teoría especial de la relatividad, se encontraron trabajos adicionales, “Los conceptos del espacio-tiempo entre Newton y Einstein para la enseñanza de la física” (Ortiz 2017) trabajo en el cual se aborda teóricamente los conceptos de espacio y tiempo planteados por Newton y el concepto espacio-tiempo de Einstein, a partir del análisis desde lo teórico y lo metodológico, realiza una implementación en el aula en donde abordan las concepciones que los estudiantes tienen del espacio y el tiempo, además de indagar sobre las nociones de absoluto y relativo de estos dos conceptos. También se encontró el trabajo *Herramienta didáctica para la enseñanza de algunos conceptos de relatividad especial partiendo*

de un evento de naturaleza electromagnética (Martínez 2012) en el cual se elabora un sitio web que funciona bajo vídeos, animaciones y simulaciones de los fenómenos electromagnéticos y a partir de este reconocer distintos conceptos abordados en el curso de relatividad especial.

Estos trabajos aportan en general al reconocimiento de la importancia en la creación de propuestas, a partir del análisis de distintos aspectos característicos de la teoría especial de la relatividad como son: concepto espacio-tiempo, ecuaciones de Maxwell, electromagnetismo, entre otros. Es importante reconocer aquí que efectivamente, la enseñanza de la relatividad no puede estar reducida a la formalización matemática y desarrollo algorítmico, sino que, es posible abordarla en el aula por medio de enfoques didácticos y reflexivos que permiten un aprendizaje significativo en los estudiantes.

1.4.3. Reflexiones de orden metodológico

En los trabajos o autores cuyos aportes guardan relación con el enfoque histórico, filosófico y conceptual, bajo el cual se desarrolla el presente trabajo, se encontraron distintos documentos que más allá de ser considerados antecedentes, también son referentes para el desarrollo metodológico.

Dentro de los autores internacionales, se encuentra Matthews Michael y su publicación *“Un lugar para la historia y filosofía en la enseñanza de las ciencias”*, en donde insiste en la importancia del enfoque histórico y constructivista en la enseñanza de las ciencias. El autor plantea la forma en que los estudios histórico-filosóficos permiten el entendimiento de los conceptos y teorías, puesto que este enfoque permite poner de precedente los problemas de conocimientos, las controversias científicas, y demás factores presentes en el desarrollo y establecimiento de teorías. Abordar estos factores, según Matthews permite humanizar la ciencia, es decir, dejar a un lado el absolutismo, tan característico de la ciencia, y lograr recuperar el valor pragmático de esta, otorgándole así, un verdadero sentido ontológico y epistemológico que se encuentra en la base de esta.

A nivel nacional, se cuenta con Ayala María Mercedes quien ha realizado reflexiones a la recontextualización de saberes en la formación de maestros de ciencias, en el artículo *“Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades”* pone de precedente que se deben considerar distintos aspectos que permiten

tanto la comprensión como la investigación misma, los aspectos de orden histórico, epistemológico y social permiten procesos de difusión y apropiación de la ciencia.

Estos trabajos permitirán poner en diálogo la importancia de considerar diferentes aspectos que, aunque no suelen tenerse en cuenta para la enseñanza de la física, si hacen parte del establecimiento de la ciencia, en este sentido es necesario desarraigarnos de la idea de la física netamente matemática y procedimental y empezar a reconocerla como un conjunto de aspectos históricos, filosóficos y teóricos.

2. SOBRE LAS DISCUSIONES FILOSÓFICAS

Einstein se benefició de consideraciones filosóficas para formular la teoría de la relatividad y a su vez esta teoría influyó en el desarrollo de la filosofía del siglo XX. Si bien, la teoría especial de la relatividad es una teoría física, no se puede omitir entonces el análisis filosófico de esta, teniendo en cuenta que consideran conceptos que han sido fuertemente estudiados en la filosofía.

La primera vez que Einstein hizo referencia al sentido filosófico de la Relatividad fue en 1915, momento en el cual dirigió una carta a Moritz Schlick en donde comentó que el artículo que él había escrito sobre las discusiones filosóficas presentes en la teoría de la relatividad era bastante acertado e hizo referencia específicamente a dos grandes autores que había estudiado cuando era joven *“En esto también vio usted correctamente que esta línea de pensamiento tuvo una gran influencia en mis esfuerzos, y más concretamente, E. Mach, e incluso más Hume, cuyo Tratado sobre la naturaleza humana había estudiado con avidez y con admiración poco antes de descubrir la teoría de la relatividad”*

Y, vuelve a referirse a sus influencias filosóficas por segunda vez en 1949 por medio de una serie de publicaciones en las cuales participó *“Notas autobiográficas”* (1949). En esta específicamente describe cuales fueron dichas influencias y lo hace presentando un experimento mental en donde se preguntaba que vería si corriera detrás de un rayo de luz a la misma velocidad que este y llegó a la conclusión que si utilizaba los principios de la mecánica newtoniana vería el rayo como una onda estática. Para Einstein esta era una conclusión errónea y cualquier intento que se hiciera bajo el axioma del tiempo o espacio absoluto estaba condenado al fracaso; sin embargo, afirma que para dar solución de dicho problema la lectura de David Hume y Ernst Mach fue decisiva *“En mi caso, el pensamiento crítico que hacía falta para descubrir este punto central lo fomentó especial y decisivamente la lectura de los escritos filosóficos de David Hume y Ernst Mach”*.

Uno de los grandes problemas al que se enfrentó Einstein fue entender la verdadera naturaleza del tiempo más que la del espacio, puesto que el estudio y análisis del concepto de tiempo no se había desarrollado con profundidad, o al menos, no tanto como el espacio. Para entender su naturaleza, era necesario analizar la validez de lo establecido por Newton en los *Principios matemáticos de la filosofía natural*; es aquí donde Newton establece la naturaleza del

espacio, tiempo y movimiento, en donde diferenciaba estos conceptos como absolutos y relativos, atribuyéndole a lo absoluto el carácter de real y matemático, es decir, conceptos que no estaban sujetos a interpretaciones a partir de experiencias.

Einstein en *Notas autobiográficas (1949)* reconoce que la mecánica newtoniana se había establecido como base fundamental del razonamiento físico, pero aquella aceptación fue quebrantada al momento de leer a Mach y su libro *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*, puesto que admiraba a Mach por su escepticismo y postura epistemológica. En este sentido, Hume y Mach fueron las fuentes filosóficas de Einstein y cuyas posturas le permitieron cuestionar la validez de la mecánica clásica.

2.1. Espacio y tiempo bajo la mirada de Hume

David Hume fue un filósofo escocés, que realizó aportes a la teoría del conocimiento y la filosofía de la moral. En el libro *A Treatise of Human Nature (1740)* establece que todas las ciencias se vinculan con la naturaleza humana, aun las que parecen más independientes, como las matemáticas, la física y la religión natural; en la segunda parte del libro Hume expone las ideas de espacio y tiempo, y la forma en que el sujeto organiza la información que recibe por medio de los sentidos.

Cabe aclarar que, aunque Hume no hace referencia a lo establecido en la mecánica Newtoniana, si insiste en la relatividad de las ideas de espacio y tiempo, puesto que, para él, lo absoluto carecía de sentido físico ya que no existía percepción sensible de este.

Antes de exponer la idea de espacio, caracteriza la idea de extensión que, según Hume, se deriva de las sensaciones o impresiones dadas por medio de la observación de los objetos, es decir que la idea de extensión se obtiene cuando se considera la distancia entre objetos. Sin embargo, estas sensaciones o impresiones no logran generar la idea de espacio. Para Hume, el espacio es una idea abstracta que está basada en la disposición de puntos y, el tiempo por su parte, se deriva por medio de las sucesiones de percepciones de cualquier tipo.

“Del mismo modo que de la disposición de los objetos visibles y tangibles obtenemos la idea del espacio, obtenemos la del tiempo de la sucesión de las ideas e impresiones y no es posible que el tiempo por sí solo aparezca o sea conocido por el espíritu”

Hume estableció que, aunque exista la noción de espacio, debe existir percepciones sucesivas para que pueda desarrollarse la noción de tiempo, en este sentido, el tiempo no aparece en la mente solo o acompañado de un objeto inmutable, sino que está completamente ligado a la sucesión de objetos mudables. Para desarrollar dicha idea recurre al siguiente ejemplo *“si se hace girar con rapidez un carbón encendido presentará a los sentidos la imagen de un círculo de fuego y no parecerá que exista ningún intervalo de tiempo entre sus revoluciones, por la mera razón de que es imposible, para nuestras percepciones, sucederse con la misma rapidez con que se comunica el movimiento a los cuerpos extremos”*

Para Hume algo característico del tiempo es que consiste en partes diferentes, es decir, se conciben duraciones más largas o cortas y estas partes no pueden ser coexistentes, deben ser distintas, es decir, anteceder o ser posterior a otra, por ejemplo, las horas, los días, los años, etc., debe mantener esta relación.

Bajo esta perspectiva, se empieza a reconocer que no se puede hablar del espacio y el tiempo como ideas separadas, sino que, por el contrario, el espacio y el tiempo, bajo la mirada de Hume, es el orden y sucesión en que los objetos existen.

A partir de esto se puede concluir que, aunque no exista una referencia directa, aquellas ideas de espacio y tiempo contradice completamente a la característica de absoluto que consideraba Newton, puesto que no había forma de que estas dos ideas estuvieran desligadas y fueran externas a la experiencia del sujeto. Aquí el espacio y el tiempo no son considerados como objetos físicos sino como una forma de conocer y organizar la experiencia.

2.1.1. Noción de infinito en los conceptos de espacio y tiempo

Como se ha visto hasta el momento, aquellas ideas de espacio y tiempo devienen de nuestras percepciones por medio de nuestros sentidos, pero a su vez, los sentidos nos proporcionan ideas simples e indivisibles; así que, cuando se habla del espacio y el tiempo, para Hume era fundamental realizar un análisis del carácter infinito que se le atribuyen a estas dos ideas, puesto que estas no corresponden a la experiencia o sensaciones internas del sujeto.

2.1.2. Espacio

Hume se opone a la idea de que toda cosa puede ser dividida infinitamente, ya que esta afirmación es lo mismo que decir que una extensión finita comprende un número infinito de partes.

Por ejemplo, cuando a una extensión, se le aumenta el doble, el triple, el cuádruple, etc., se convierte en una magnitud más grande, si la adición tiende al infinito, la extensión se hace infinita. Bajo esta idea, se puede afirmar que un número infinito de partes es la misma idea de una extensión infinita, por ende, se llega a la conclusión de que una extensión finita no puede contener un número infinito de partes, y por ello, no puede ser divisible infinitamente.

Nuestra observación y experiencia no permite una concepción adecuada del infinito, si se considera posible dividir algo en partes inferiores, pero este no puede ser dividido infinitamente puesto que excede la comprensión de nuestras facultades; e intentar demostrar la divisibilidad infinita de la materia, según Hume, son ideas sofisticas.

Por ejemplo, cuando se habla de la milésima parte de un grano de arena, se puede generar una idea a partir de una relación matemática, pero lo matemático es algo que carece de existencia física, así que, la mente no puede representar una imagen inferior al grano de arena. Es decir que, aquella idea del grano de arena no es divisible en más ideas. Es importante resaltar aquí, que este ejemplo planteado por Hume corresponde a la noción misma de partícula o de átomo como la mínima partícula indivisible. Lo mismo pasa cuando nos alejamos de un punto fijo, habrá un momento en que dejaremos de observarlo, pero no es por falta de luz, si no, porque se halla a tal distancia en donde nuestras impresiones no pueden dar razón de dicho punto.

Es este sentido, para Hume la capacidad de la mente del sujeto se halla limitada tanto en la imaginación, como en lo sensorial. La imaginación no puede formar una idea más allá de cierto grado tanto de pequeñez como de grandeza, nada puede ser más grande o pequeño que aquello que permite los sentidos y a su vez, los sentidos nos dan imágenes desproporcionadas.

2.1.3. Tiempo

Hume también realiza una crítica a la idea de tiempo infinito, así como el espacio no poseía esta característica, lo mismo sucedía con el tiempo; este debía estar compuesto de momentos únicos e indivisibles. Hume había establecido la idea del tiempo como sucesión, si cada momento no antecediera o sucediera a otro, existirían entonces, un número infinito de momentos coexistentes lo cual era una contradicción notoria. Aquí, Hume utiliza el mismo razonamiento para negar la idea del tiempo infinito, un intervalo cualquiera, si bien puede ser dividido en partes inferiores, no es posible dividirlo en infinitos instantes de tiempo.

2.2. Espacio y tiempo bajo la mirada de Mach

Por su parte, Mach, filósofo y físico, reconocido por las reflexiones filosóficas sobre la forma en que las sensaciones juegan un papel fundamental en el conocimiento físico, realiza un análisis y crítica de la mecánica newtoniana, específicamente frente a lo que Newton consideraba espacio y tiempo absoluto, Mach pone de precedente que el libro *The science of mechanics* tenía una tendencia explicativa y la matemática en este era accesoria, puesto que dentro de los análisis no tendría en cuenta desarrollos matemáticos. En la cuarta parte del libro examina a detalle cada una de las afirmaciones que realizó Newton con respecto a las ideas de espacio y tiempo absoluto y a partir de diferentes análisis estableció porque estos conceptos no podían ser considerados válidos.

2.2.1. Tiempo

Newton establecía que, a pesar de que los conceptos de tiempo, espacio, lugar y movimiento eran palabras conocidas por todo el mundo, siempre se hablaba de estas por medio de su relación con objetos externos, pero para él, existían dos formas de caracterizar estos conceptos, como absolutos y relativos.

Por un lado, al tiempo absoluto le atribuía el carácter de *“verdadero y matemático... en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente, sin tener en cuenta nada externo. También se llama "duración".* Y, por otro lado, el tiempo relativo lo definía como *“aparente y común... es una medida sensible y externa del tiempo absoluto, estimado por los movimientos de los cuerpos, sean exactos o desiguales, y se emplea comúnmente en lugar del tiempo verdadero; como una hora, un día, un mes, un año...”*.

Newton establecía que, por ejemplo, la medida del tiempo relativo, como lo son los días naturales, los consideramos como iguales cuando en realidad no lo son; sin embargo, los astrónomos corregían estas desigualdades para dar cuenta de los movimientos celestes de una forma más precisa. Aunque todos los movimientos se podían acelerar y retardar, el flujo del tiempo absoluto no se podía cambiar, en conclusión, la duración era siempre la misma independientemente de su movimiento.

Con respecto a las ideas de tiempo absoluto, Mach consideraba que Newton se encontraba bajo una filosofía medieval, es decir, al parecer, dichas ideas estaban basadas en la creencia y

concordaban con la búsqueda o definición de las características de la existencia de Dios. Mach estableció un ejemplo para mostrar que no era aceptable la idea de tiempo que establecía Newton.

“Las vibraciones de un péndulo tienen lugar en el tiempo cuando su excursión depende de la tierra. Sin embargo, dado que, en la observación del péndulo, no estamos bajo la necesidad de tener en cuenta su dependencia de la posición de la Tierra, sino que podemos compararla con cualquier otra cosa (cuyas condiciones, por supuesto, también dependen de la posición de la tierra), surge fácilmente la idea ilusoria de que todas las cosas con las que la comparamos no son esenciales.” A pesar de dicha idea ilusoria, insistía en la relación y conexión que tienen todas las cosas en el mundo, es decir, para dar cuenta de que lo físico siempre se debía relacionar con lo externo.

Mach se encontraba en desacuerdo con la idea de medir el cambio de las cosas en el tiempo, por el contrario, para él, el tiempo era la abstracción que se lograba mediante el cambio de las cosas. En este sentido, hablar del tiempo absoluto como independiente de los cambios no sería posible, puesto que esta concepción no tendría valor práctico, ni científico y pasaría a ser entonces, una idea metafísica.

Adicionalmente, Mach introduce la idea de irreversibilidad del tiempo, es decir, el tiempo contaba con la característica de fluir en un solo sentido, y para ello establecía la siguiente afirmación *“Si contemplamos dos cuerpos de diferentes temperaturas, puestos en contacto y abandonados enteramente a sí mismos, encontraremos que sólo es posible que existan mayores diferencias de temperatura en el campo de la memoria y diferencias menores en el campo de la percepción sensorial, y no al revés”*, es decir que, es posible llegar a la idea de tiempo por medio de la conexión entre aquello que está contenido en la memoria y lo que está contenido en nuestra percepción; es por ello que el tiempo fluye en un solo sentido definido.

2.2.2. Espacio

Al igual que con el tiempo, Newton caracterizaba el espacio como absoluto y relativo, el espacio absoluto permanecía inmutable e inmóvil, además existe en sí mismo sin relación alguna a cualquier fenómeno; el espacio relativo, en contraste, era una medida de una porción del espacio delimitada u ocupada por cuerpos, los cuales podían estar en movimiento, es decir, que estaba determinada por los sentidos en relación con otros cuerpos.

Así pues, el movimiento absoluto está determinado, cinemáticamente, por la translación, de un cuerpo, de un lugar absoluto a otro lugar absoluto, bajo esta misma idea, definía que el movimiento relativo estaba determinado, cinemáticamente por la traslación de un cuerpo de un lugar relativo a otro lugar relativo. Estas definiciones acerca del movimiento se hacen principalmente para dar cuenta del movimiento de los cuerpos celestes, aunque se suponen aplicables a todos los movimientos en el universo, ya que las leyes del movimiento planteadas por Newton tienen un carácter universal.

Ahora bien, la forma de diferenciar estos dos tipos de movimiento, para no caer en equivocaciones, acudió a una estrategia dinámica, según Newton, era por medio de las fuerzas centrífugas, y otras fuerzas que surjan como resultado del movimiento acelerado del cuerpo; para ilustrar esta idea estableció que, en un movimiento circular que era relativo no existían fuerzas centrífugas, pero en el movimiento circular absoluto existían dichas fuerzas, que serían mayores o menores dependiendo de la cantidad de movimiento.

“Por ejemplo. Si un balde, suspendido por una cuerda larga, se gira con tanta frecuencia que finalmente la cuerda se retuerce fuertemente, entonces se llena de agua y se mantiene en reposo junto con el agua; y luego, por la acción de una segunda fuerza, se pone repentinamente girando en sentido contrario, y continúa, mientras la cuerda se desenrosca, durante algún tiempo en este movimiento la superficie del agua al principio estará nivelada, tal como estaba antes de que el balde comenzará a moverse; pero, posteriormente, el balde, al comunicar gradualmente su movimiento al agua, hará que comience a rotar, y el agua retrocederá poco a poco desde el medio y se elevará por los lados del balde, asumiendo su superficie una forma cóncava. (Este experimento lo he hecho yo mismo) ... Al principio, cuando el movimiento relativo del agua en el balde era mayor, ese movimiento no produjo tendencia alguna de retroceso del eje; el agua no hizo ningún esfuerzo por moverse hacia la circunferencia subiendo por los lados del balde, así permaneció nivelada, y por esa razón su verdadero movimiento circular aún no había comenzado. Pero después, cuando el movimiento relativo del agua había disminuido, el aumento del agua a los lados del balde indicó un esfuerzo por alejarse del eje; y este esfuerzo reveló el movimiento circular real del agua, aumentando continuamente, hasta que alcanzó su punto más alto, cuando relativamente el agua estaba en reposo en el recipiente ...”

Nótese que, en el anterior experimento mental citado por Newton, el criterio de distinción entre el movimiento absoluto y el movimiento relativo son estas fuerzas centrífugas. Sin embargo, llama la atención que definición del movimiento, en relación con la traslación, es una definición cinemática pero el criterio de distinción entre el movimiento relativo y absoluto es de carácter dinámico, ya que poder distinguir los movimientos absolutos y relativos, cinemáticamente, resulta complicado, puesto que las partes del espacio inamovible, lo que se considera espacio absoluto, no queda bajo la observación de los sentidos. Por su parte Leibniz, señala un profundo error en el criterio presentado por Newton, al plantear que el movimiento relativo es del agua con respecto al balde, cuando realmente el que se debía tomar en cuenta es el movimiento relativo del agua con respecto a todos los demás cuerpos presentes en el universo; así pues, el experimento de la rotación del balde es uno de los tantos esfuerzos fallidos por demostrar el movimiento absoluto y por tanto la existencia del espacio absoluto.

Por otra parte, con base en lo establecido por Newton, Mach consideraba que era una contradicción hablar sobre el espacio absoluto puesto que era una idea propia del pensamiento y no de la experiencia. No había forma, entonces, de hablar de lo absoluto porque como ya se había demostrado los principios de la mecánica estaban basados en conocimientos obtenidos de la experimentación sobre posiciones y movimientos relativos. *“Nadie tiene competencia para emitir juicios acerca del espacio o movimiento absolutos, pues son puras cosas del pensamiento, puras construcciones mentales que no se pueden reproducir en la experiencia. Todos nuestros principios de mecánica son, como lo hemos demostrado con detalle conocimiento experimental referentes a las posiciones y movimientos relativos de los cuerpos”* Einstein, A. Grünbaum, A. Eddington, A. y otros. (1995).

A partir de esto, Mach concluía que Newton estaba influenciado bajo una filosofía esencialista, puesto que suponía que aquello que se percibía por medio de los sentidos no era verdadero, así pues, debía haber algo que se encontraba por fuera de estos, es decir, la esencia; la forma de conocer el mundo no era por medio de lo aparente, si no que había que conocer su esencia. Por el contrario, para Mach, conocer el mundo, solo podía darse por medio de las sensaciones, lo verdadero y de lo que se puede dar razón es lo que se percibe.

Todas las discusiones presentadas aquí, están hechas bajo una descripción de orden teórico, Einstein a pesar realizar estas reflexiones, según Sánchez Ron (2007) Einstein posteriormente se

vio sumergido en las matemáticas como guía para el desarrollo de sus investigaciones, convirtiéndose en este, un punto de fractura entre el desarrollo de la TER y los fundamentos de Mach, quien consideraba la matemática como accesoria en la definición de las ideas de espacio y tiempo.

2.3. La filosofía en la TER según Moritz Schlick

Moritz Schlick, filósofo y físico, reconocido por fundar el círculo de Viena, presentó un gran interés por la filosofía de las ciencias. Diez años después de que Einstein estableciera la teoría de la relatividad, publica *El significado filosófico de la teoría de la relatividad*, en donde realiza una valoración filosófica de esta.

Para Schlick el desarrollo de dicha teoría representaba tanto la fuerza como la debilidad de Einstein puesto que, por medio de esta, hizo que la física fuera concluyente, pero a su vez dejaba su teoría abierta a malentendidos e interpretaciones erróneas tanto en la naturaleza de la teoría como en las consecuencias de esta.

2.3.1. La filosofía en la física

Hablar del significado filosófico de la teoría de la relatividad como lo hizo Moritz Schlick, generó debates y contradicciones, había quienes consideraban que esta teoría se encontraba únicamente en el campo de la física y las matemáticas. Según Schlick, los filósofos al hacer alusión a algún sentido filosófico lo hacían únicamente desde las analogías, sin embargo, para él, como filósofo y físico, no había forma de separar estas dos ramas. Para no caer en equivocaciones Schlick enfatizaba en que realizar el análisis de las implicaciones filosóficas de la teoría de Einstein, no significaba que esta fuera teoría filosófica.

La teoría especial de la relatividad se caracteriza esencialmente porque se construye por primera vez el concepto espacio-tiempo. El espacio y el tiempo eran conceptos que habían sido desarrollados inicialmente desde la filosofía, filósofos como Platón y Kant hicieron grandes aportes al establecimiento y caracterización de estas ideas.

El análisis filosófico de la física era muy común antes del surgimiento de la física moderna, ya que estos análisis se lograban más fácilmente cuando se realizaban dentro de una investigación que estaba dirigida a la interpretación de datos observacionales, es decir, la experimentación. Según Schlick “...quienes hacen la nueva física no suelen tener el tiempo libre, o no consideran

como objetivo, exponer y elaborar la filosofía implícita en sus construcciones... muchos físicos se han equivocado al creer que la filosofía de la física es lo mismo que una popularización de la física”

Schlick establecía que, si bien existían filósofos de la ciencia, estos no se interesaban en los procesos de pensamiento que conducían a los diferentes descubrimientos, si no que más bien buscaban un análisis lógico de la teoría completa, incluyendo los procesos que establecían su validez. Es decir, no se encontraban interesados en el contexto del descubrimiento, sino el contexto de la justificación.

En cuanto a la teoría de la relatividad especial y general, no hubo algún documento en donde Einstein hiciera referencia a las consideraciones filosóficas, sino que, Schlick construye estas a partir de sus comentarios en diferentes publicaciones o análisis de las obras de Einstein.

2.3.2. Algunas menciones históricas

Al igual que todas las teorías físicas, el establecimiento de la teoría especial de la relatividad correspondió a un largo desarrollo histórico. Dentro de los principales autores mencionados por Schlick fueron Leibnitz y Clarke, y su famosa correspondencia, Leibniz se encontraba en desacuerdo con los planteamientos de entidades absolutas que planteaba Newton, ya que estas no eran perceptibles y no había forma de verificarlas experimentalmente, sin embargo, no fue Newton quien dio respuesta, si no su discípulo Samuel Clarke, quien argumentaba como ciertos los planteamientos de Newton. Por parte de Leibniz, fueron llevadas a cabo varias discusiones afines a la relatividad, de hecho, reconoció la relación entre el orden causal y temporal, en algunas ocasiones pareciera que Leibniz hubiera tomado argumentos de la teoría de Einstein. La concepción de relatividad posteriormente fue abordada por Ernst Mach, tal como se demostró en el apartado § 2.2.

Si bien, existió un desarrollo en el estudio de los conceptos de espacio y movimiento, no sucedió lo mismo con el concepto tiempo; quien desarrolló a profundidad la relatividad de la medida del tiempo fue Mach, pero la relatividad en la simultaneidad fue trabajada únicamente por Einstein. Precisamente fue la combinación de la relatividad del tiempo y movimiento lo que permitió que la teoría de Einstein fuera concluyente y obtuviera mejores resultados que las teorías anteriormente propuestas.

La filosofía en los conceptos de espacio y tiempo fue desarrollada a lo largo de la historia, con el fin de combinar a la observación y el análisis matemático.

2.3.3. Construcción de los conceptos por definición

“La base lógica de la teoría de la relatividad es el descubrimiento de que muchos enunciados, que se consideraban capaces de demostrar verdad o falsedad, son meras definiciones.” Si bien, lo enunciado por Schlick no es una formulación que dé cuenta del significado filosófico de la relatividad, esta hace parte lógica del planteamiento de la teoría. Para desarrollar dicha idea propone varios ejemplos.

Cuando se habla de las unidades de medida, Schlick establece que estas son cuestiones de definición, es decir que, no existe una sola definición de medida, así pues, no importa el tipo de medida que se utilice para realizar mediciones sobre distancias, estas pueden hacerse en pies, metros o años luz. También la comparación de distancias es una cuestión de definición, que una distancia sea congruente con otra situada en otro lugar nunca puede probarse, según Schlick *“...sólo puede mantenerse en el sentido de una definición. Hablando más precisamente, puede mantenerse como verdadero sólo después de que se dé una definición de congruencia; por tanto, depende de una comparación original de distancias que es cuestión de definición.”*

Otra cuestión de definición se refiere al tiempo, por ejemplo, la simultaneidad de eventos que ocurren en distintos lugares. Sin embargo, esto no se conocía antes de que Einstein basara la TER en este descubrimiento lógico.

Schlick establece que las definiciones que se emplean para la construcción del espacio y el tiempo son definiciones coordinadas, es decir, estas están dadas por la coordinación de un objeto físico a algún concepto fundamental, por ejemplo, el concepto de "longitud igual" se define por referencia a un objeto físico, en términos de Einstein, por medio de una regla o una varilla sólida, cuyo transporte establece distancias iguales; otro ejemplo, es el concepto "simultáneo" este se define por el uso de rayos de luz que describen distancias iguales. Así pues, Schlick (2006) afirmaba que *“todas las definiciones de la teoría de la relatividad son de este tipo, definiciones coordinadas”*.

2.3.4. *Sistemas de coordenadas y transformaciones*

En la Teoría Especial de la Relatividad, las diferentes mediciones se realizan con respecto a diferentes observadores. Sin embargo, esto ha llevado a interpretaciones erróneas, por ejemplo, se considera que la medición del espacio-tiempo está sujeta a la subjetividad del observador, sin embargo, esta definición de simultaneidad no está relacionada con la perspectiva del observador quien puede estar ubicado en distintos marcos de referencia.

“También podríamos intercambiar la coordinación y dejar que el observador ubicado en el sistema "en movimiento" emplee la definición de tiempo del fuera de servidor ubicado en el sistema "en reposo" y viceversa; o incluso podríamos dejar que ambos empleen la misma definición de tiempo, por ejemplo, la del sistema "en reposo"”

Schlick establece que dichas variaciones pueden conducir a diferentes transformaciones, a las transformaciones de Lorentz o a la transformación clásica de un sistema en reposo a un sistema en movimiento. Así, el considerar diferentes observadores solo es una forma de expresar la pluralidad de sistemas de definición; por tanto, según Schlick *“En una exposición lógica de la teoría de la relatividad, el observador puede ser eliminado por completo.”*

Según el autor las definiciones son de carácter arbitrario y a partir de los cambios en las definiciones surgen distintos sistemas descriptivos, los cuales son equivalentes entre sí, esto permite pasar de un sistema a otro mediante una transformación. En este sentido, el concepto “relatividad” se debe interpretar *“relativo a un determinado sistema de definiciones”*, la relatividad implica la pluralidad de las formas de expresión y no a diferentes visiones.

Para ilustrar dicha afirmación, el autor recurre a un ejemplo, dos afirmaciones como *“la habitación mide 23 pies de largo”* y *“la habitación mide 7 metros de largo”* afirman el mismo hecho, es decir que ambas afirmaciones son equivalentes, en este caso, el número que caracteriza la longitud es relativo a la unidad de medida, el hecho de que la verdad sea enunciada de dos formas distintas no elimina de concepto de verdad.

“La relatividad no significa un abandono de la verdad; solo significa que la verdad se puede formular de diversas formas.”

2.3.5. *Espacio y tiempo*

Como se mencionó anteriormente, los conceptos de espacio y tiempo han sido estudiados por distintos filósofos, como Platón quien consideraba que estos eran objetos ideales que pertenecían al mundo de las ideas; o Spinoza quien consideraba que el espacio y el tiempo eran atributos de Dios; o Kant quien negaba la realidad del espacio y el tiempo y los consideraba construcción de la mente humana, en donde el ser humano combinaba las percepciones sensoriales, de cualquier tipo, y las recolectaba en un sistema ordenado.

Pero para Einstein, el espacio y el tiempo no son formas de orden para la mente, si no que estos *“Constituyen un sistema relacional que expresa ciertas características generales de los objetos físicos y, por tanto, son descriptivos del mundo físico.”*

Todas las definiciones que se han dado sobre el espacio y el tiempo a lo largo de la historia han sido invenciones propias de la mente, pero según lo plantea Schlick, no todas las invenciones pueden ser utilizadas para describir el mundo físico.

3. SOBRE LAS DISCUSIONES FÍSICAS

Durante los procesos de enseñanza que se dan en distintos escenarios académicos, se suelen llegar a afirmaciones que surgen de las interpretaciones subjetivas de la teoría especial de la relatividad y particularmente de sus consecuencias. La relatividad suele ser interpretada como la mecánica que describe los sistemas en movimiento que se desplazan a altas velocidades y a su vez, la forma en la que es abordada hace ver a la mecánica clásica como inexacta y errónea, sin profundizar en el hecho de que el planteamiento de la relatividad responde a problemas de conocimiento, es decir, a la forma en que se conoce y se explican los fenómenos físicos.

Es por ello, que es importante realizar un análisis al trabajo realizado por Einstein, específicamente en el artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” teniendo en cuenta que es en este se plasma las bases de la relatividad especial, con el fin de profundizar en aquellas discusiones que dieron paso y, así pues, generar elementos para la comprensión del propósito de la relatividad especial.

En 1905 Albert Einstein realiza una serie de 3 publicaciones que envía a los *Annalen der Physik*, revista científica alemana; los tres artículos mantenían una estructura similar, en primer lugar, enunciaba alguna asimetría se encontraba en el campo de la física para ese momento, posteriormente proponía un principio que permitiera eliminar dichas asimetrías y por último presentaba predicciones empíricas contrastables. El tercer artículo, *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*, es el primero en donde presenta los inicios de la Teoría Especial de la Relatividad, junto con los dos postulados que la componen y sus consecuencias.

Si bien, la TER fue, y ha sido, considerada como una teoría que revolucionó la historia y el avance de la física, para Einstein no era así, el calificaba el establecimiento de su teoría como “... *el desarrollo natural de una línea que se remonta a siglos y siglos...*” Einstein, A. Grünbaum, A. Eddigton, A. y otros. (1995). pg.117, y dicha afirmación coincide y sustenta las discusiones filosóficas presentadas en el segundo capítulo y las que se llevarán a cabo en lo que sigue.

3.1. Las bases de la TER

Einstein realiza una introducción en el ensayo *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento* en donde menciona dos grandes problemáticas presentes en la electrodinámica y en la mecánica. Es importante señalar, que a finales del siglo XIX, se logra la consolidación de las

ciencias físicas en dos grandes teorías, la mecánica clásica, que establecía las leyes universales del movimiento de los cuerpos; y el electromagnetismo, que a través del concepto de onda electromagnética se ofrece una explicación a fenómenos electromagnéticos, ópticos y termodinámicos, todo ello basado en las leyes de la electrodinámica, es decir, ecuaciones de Maxwell; ambas teorías basadas en el principio de causalidad; es así, que las leyes de la física eran entonces, los principios de la mecánica clásica y las leyes del electromagnetismo.

3.1.1. Sobre el principio de causalidad y las leyes físicas

Uno de los rasgos distintivos de la mecánica clásica es que le atribuye a la naturaleza un orden y una regularidad que se expresa mediante leyes universales basadas en isotropía y homogeneidad del espacio en la linealidad del tiempo y principalmente en la causalidad lineal y determinista. Así, esta forma de entender el comportamiento físico de la naturaleza es adoptada por las subsecuentes teorías físicas como el electromagnetismo, cuyas leyes están basadas en el principio de causalidad, dicho principio les atribuye una causa a los fenómenos.

Este principio de causalidad es planteado como un principio universal, lo cual hace de él, un principio teórico y no experimental. Según August Messer, *“Para que los cambios nos resulten comprensibles, necesitamos referirnos a sus causas. Suponemos que todo cambio tiene su causa. Este principio es válido en su universalidad no por fundarse en la experiencia, pues entonces deberíamos haber probado su validez en todas las experiencias posibles.”* Guridi, V. Arriasecq, I. (2004). Este principio de causalidad que se expresa en las teorías físicas puede ser entendido como una categoría del conocimiento humano, en cuanto comprendemos los fenómenos cuando podemos atribuirle causas, y de esta manera la única exigencia formal que se le hace a una teoría es que no rompa el principio de causalidad, de tal manera cualquier rompimiento del principio de causalidad implica una anomalía en la teoría que requiere inevitablemente ser subsanada. Desde este requerimiento a las teorías es que Einstein hace notar la anomalía que se genera al aplicar las leyes del electromagnetismo a los cuerpos en movimiento.

Para Einstein, las leyes de Maxwell funcionan muy bien para los cuerpos en reposo, en tanto la aplicación de estas leyes a la explicación del comportamiento de los cuerpos cargados y las corrientes estáticas no conducían a violar el principio fundamental de la causalidad. Pero cuando se aplicaban estas leyes a los cuerpos en movimiento aparecían asimetrías que violaban este principio fundamental, ya que se le asociaba causas diferentes a un mismo efecto.

Para ilustrar dicha asimetría Einstein propuso examinar la siguiente situación: la interacción entre un imán y un conductor cuando alguno de los dos se encuentra en movimiento respecto al otro. En un primer caso, cuando se considera que el imán está en movimiento con una velocidad v respecto al conductor, alrededor del imán se induce un campo eléctrico, el cual genera una corriente en el conductor. En este caso la corriente eléctrica, que es el efecto, es asociada con una causa que es la energía del campo eléctrico, la cual está definida.

En un segundo caso, cuando se considera que el conductor se mueve con una velocidad $-v$ respecto al imán, alrededor del imán no se induce ningún campo eléctrico, sin embargo, en el conductor se observa una corriente eléctrica, a la cual está asociada una fuerza electromotriz. Esta corriente al ser producida por una fuerza no tiene una energía definida asociada.

Sin embargo, las corrientes eléctricas generadas en ambos casos tienen igual magnitud y dirección, por lo cual afirma Einstein que este efecto depende únicamente del movimiento relativo entre el imán y el conductor, aspecto por el cual, la causa de la corriente eléctrica debería ser la misma en ambos casos, aun así, la explicación que se da en cada uno de los casos conduce a una asimetría que rompe con el principio de causalidad, ya que en el primer caso se supone energía definida y en el segundo no.

“Se sabe que cuando la electrodinámica de Maxwell – tal como se suele entender actualmente – se aplica a cuerpos en movimiento, aparecen asimetrías que no parecen estar en correspondencia con los fenómenos observados... En este caso, el fenómeno que se observa depende solamente del movimiento relativo entre el conductor y el imán, mientras que de acuerdo con la interpretación común se deben distinguir claramente dos casos muy diferentes, dependiendo de cuál de los dos cuerpos se mueva. Si se mueve el imán mientras que el conductor se encuentra en reposo, alrededor del imán aparece un campo eléctrico con cierto valor para su energía... Pero si el imán está en reposo y el conductor se mueve, alrededor del imán no aparece ningún campo eléctrico, sino que en el conductor se produce una fuerza electromotriz que en sí no corresponde a ninguna energía” (Einstein, 1905)

A partir de esto se puede observar que, si bien en ambos casos se producía una corriente eléctrica, el problema no radica en el fenómeno mismo, si no en el hecho de que, en la explicación, a una se le asociara energía y a la otra no; al efecto, a pesar de ser el mismo, se le atribuían dos causas distintas, tanto en naturaleza como en cantidad, así, el problema o la asimetría se presenta

entonces en la explicación física, ya que asumir esta asimetría implica aceptar que existen propiedades, en los fenómenos, inherentes al reposo y al movimiento absoluto, de los cuales no existe evidencia física; así, no hay forma de diferenciar la causa de la corriente en el conductor, debido a que no hay nada propio en el fenómeno que indique cuál de los dos cuerpos está en movimiento absoluto.

Ahora bien, la idea del movimiento absoluto, tan aceptada en la mecánica clásica, implica los conceptos de espacio y tiempo absolutos, ya que el movimiento absoluto es aquel que se da con respecto al espacio absoluto y transcurre en el tiempo absoluto, así, la posibilidad de determinar el movimiento absoluto de un cuerpo llevaría inevitablemente a tener una evidencia del espacio y del tiempo absoluto. Einstein menciona cómo todos los intentos por la determinación experimental del movimiento absoluto son fallidos por lo cual los conceptos de espacio y tiempo absoluto no son conceptos físicos, es decir que, las bases mismas de la mecánica clásica son especulaciones metafísicas. *“Otros ejemplos de esta índole, así como los intentos infructuosos para constatar un movimiento de la Tierra con respecto al “medio de propagación de la luz” permiten suponer que no solamente en mecánica sino también en electrodinámica ninguna de las propiedades de los fenómenos corresponde al concepto de reposo absoluto”*

Para dar solución a la anomalía presentada en la electrodinámica Einstein propone desechar la idea de espacio y tiempo absoluto, y definir nuevamente el espacio y el tiempo como relativos, discusiones que habían sido planteadas por pensadores como Leibniz, Hume, Mach, pero que hasta el momento habían tenido fuertes dificultades para ser integradas a las teorías físicas, ya que la mecánica clásica gozaba de gran aceptación y exhibía una fuerte capacidad explicativa, en este sentido, lo que pretende Einstein es transformar las bases mismas de la mecánica, para él estas definiciones *“son creaciones libres de la inteligencia humana, herramientas del pensamiento que deben servir para relacionar vivencias y comprenderlas así mejor”* (Einstein, 1998)

3.1.2. El tiempo como medida: la simultaneidad

Si bien, Einstein se encontraba de acuerdo con las ideas de espacio, tiempo y movimiento en relación con lo sensible, tal como lo planteaban E. Mach y D. Hume, él no define estos conceptos limitándose únicamente a mencionar que son relaciones de objetos coexistentes y de sucesión, sino que establece el tiempo y el espacio como medidas, que dependen de la forma en

que se hace la medida, así pues, se pone en la tarea de explicitar como podían ser construida la métrica de tales relaciones y para ello, lo primero que hace es estudiar y *construir* la idea de tiempo.

La idea de tiempo para Einstein estaba relacionada con *eventos simultáneos*, en donde, uno de estos eventos permite asignar un valor al tiempo y el otro una existencia, por ejemplo, relaciona la llegada de un tren a una estación con la posición de las manecillas del reloj, si estos dos eventos son simultáneos, entonces la posición de las manecillas del reloj le asignará un valor al tiempo en que llega el tren a la estación, de igual manera se le asigna valores a los tiempos de eventos no simultáneos con la llegada del tren a la estación, es decir, eventos que son posteriores o anteriores a la llegada del tren. Ahora bien, la calificación de que dos eventos son simultáneos depende de las condiciones en que se haga la medición de estos.

Si bien, esta asignación de tiempo establecida por medio de dos eventos que ocurren simultáneamente, la llegada del tren y la marcación del reloj, parecía ser una definición bastante completa del tiempo, solo funcionaba para mediciones locales, es decir, eventos que ocurrían en la vecindad del reloj. Pero al momento de intentar dar cuenta de la simultaneidad con eventos distantes a la vecindad del reloj no funcionaba tan bien, ya que dar cuenta de dos eventos distantes requeriría establecer una medición a partir de dos relojes, el reloj del evento distante y el reloj local, así pues, sería necesario que dichos relojes estuvieran sincronizados.

Así que, Einstein intenta construir una explicación que le permitiera determinar la simultaneidad de eventos distantes, y es a través de dicha sincronización de relojes. Una forma de dar solución a esto era, poner al observador con el reloj en el origen de coordenadas para que le asignase a cada evento una posición en las manecillas del reloj al momento de recibir la señal de luz del evento. Sin embargo, tal medición no sería independiente del observador, ya que esta dependería del tiempo que tárdesse la señal luminosa desde el evento hasta el observador, es decir que entre más distantes fueran los eventos, el tiempo de la señal sería mayor, generando así una medición poco precisa de ellos.

Otra posible solución que propone Einstein era establecer dos observadores, y que de esta forma cada uno pudiera dar cuenta del tiempo de los eventos ubicados a su alrededor, por medio de relojes considerados exactamente iguales, pero nuevamente se caería en otro error; el problema en este caso es que se establecen dos tiempos diferentes y no un solo tiempo en común para ambos observadores. Cabe aclarar que, en este intento de determinar la simultaneidad, cada observador

no mide cosas distintas, sino que, no existe aquí una equivalencia en lo que ve un observador con lo que ve el otro.

Para Einstein, ese tiempo en común entre los diferentes observadores se podía establecer como el tiempo que tomaba la luz en viajar del observador A al observador B, este tiempo debía ser exactamente igual al tiempo que tomaba la luz de B a A.

Cuando se establece ese tiempo en común, se habla de una sincronización entre relojes, si se logra que la definición sea válida para más puntos, se llegan a dos consideraciones: por un lado, si el reloj A estaba sincronizado con B, entonces B estaba sincronizado con A. Por otro lado, si el reloj A estaba sincronizado con B y C, entonces los dos estarían sincronizados entre sí.

En este sentido, establecer relojes sincronizados en reposo en distintos sistemas coordenados era establecer la definición de simultaneidad y de tiempo. A partir de esto Einstein establece que el tiempo que mide un reloj en el sistema en reposo es lo mismo que el tiempo propio.

Bajo estas discusiones planteadas por Einstein se puede reconocer que no hay forma de establecer un tiempo absoluto, puesto que todas las expresiones que se hagan sobre el tiempo están dadas bajo la simultaneidad de los eventos. Recordando que el tiempo absoluto, según lo definía Newton, era independiente a lo externo, en este sentido, el tiempo absoluto no podría ser definido, sino solo caracterizado, es decir, que esta idea podría ser considerada una idea metafísica.

3.1.3. El espacio como medida: reglas fijas

Dentro de las consideraciones que realiza Einstein en cuanto a la definición de los conceptos de espacio y tiempo, este se opone a la idea del espacio absoluto que se establece en la mecánica newtoniana, puesto que se le atribuye la existencia sin relación a lo externo.

Si bien dentro de la mecánica newtoniana se define el espacio como un objeto físico, es decir, cuando se mide el espacio se realiza la medición de una porción de extensión de este, en la relatividad se define el espacio como una medida que se hace sobre un objeto, el cual tiene el atributo de extensión, esta medida permite hacer inteligible la experiencia que está dada por los sentidos. Cabe recalcar aquí que esta caracterización que se hace sobre la relatividad del espacio ya había sido analizada por Hume tal como se demostró en el apartado § 2.1.2 del presente trabajo.

En la medición del objeto, le asociamos atributos que medimos mediante una “regla” o “varilla”, en donde los extremos del objeto deben coincidir simultáneamente con los extremos de la regla o varilla. *“De acuerdo con el principio de la relatividad, la longitud a determinar en la operación, que llamaremos “longitud de la varilla en el sistema en movimiento”, debe ser igual a la longitud de la varilla en reposo”* Einstein, A. Grünbaum, A. Eddigton, A. y otros. (1995) esta medida está dada en relación con la simultaneidad del tiempo.

Einstein aclara acá que, sin embargo, la medición que se hace sobre el objeto no va a ser la misma para un marco que se encuentre en reposo que para un marco que se encuentre en movimiento relativo *“A priori no está dicho que esta segunda medición tenga que proporcionar el mismo resultado que la primera. La longitud del tren, medida desde la vía, puede ser distinta que medida desde el propio tren.”* Einstein, A. (1998). Aquí se logra evidenciar las primeras aproximaciones de la contracción de la longitud como consecuencia de las condiciones de la medición, análisis que se realizará posteriormente. Entonces si las propiedades de los cuerpos de los cuerpos y las leyes físicas cambian dependiendo de marco de referencia desde el cual se realice la medición, esto sería una contradicción clara con el principio de relatividad.

Cuando se habla de la relatividad del espacio y el tiempo, se hace referencia a que las mediciones de ambas dependen de los observadores, son estos los que asignan valor numérico a estas dos mediciones, así pues, para un mismo fenómeno las mediciones son distintas. La relación entre ellos depende de las velocidades relativas entre ambos observadores.

3.1.4. Marco de referencia y equivalencia entre marcos

Los postulados que componen la teoría especial de la relatividad se enmarcan bajo dos principios fundamentales, el principio de relatividad y la invariancia de la velocidad de la luz. De acuerdo con Einstein, este primero describe que las leyes que permiten dar razón a los sistemas físicos no dependen del estado de movimiento del sistema de coordenadas. Y el segundo, afirma que la velocidad con la que se propaga los rayos de luz es independiente al estado de movimiento de la fuente emisora.

Así pues, para cumplir con el primer postulado Einstein afirmaba que debía haber *“una ley de transformación muy precisa para las magnitudes espacio-temporales de un suceso al pasar de un cuerpo de referencia a otro.”* Con el fin de que no se rompa con el principio de causalidad.

Dado que el principio de causalidad es un principio fundamental, transformar aquellas bases de la mecánica es definir nuevamente el espacio y el tiempo, en otras palabras, desechar las ideas de espacio y tiempo absolutos y remplazarlas por espacio y tiempo relativos, de tal manera que no rompan con el principio de causalidad; y por tanto las leyes físicas se cumplan independientemente de las consideraciones que se hagan sobre el movimiento de los cuerpos, el cual también es considerado relativo. En este sentido, el sistema de coordenadas, en reposo y en movimiento absoluto con respecto al sistema en reposo, es un sistema métrico, es decir, es con base a este que se realizan las mediciones sobre los cuerpos.

“Más bien debemos suponer que, para todos los sistemas de coordenadas, en los cuales son válidas las ecuaciones mecánicas, también tienen validez las mismas leyes electrodinámicas y ópticas, tal como ya se ha demostrado para las magnitudes de primer orden. Queremos llevar esta suposición (cuyo contenido será llamado de ahora en adelante “principio de la relatividad”) al nivel de hipótesis y además introducir una hipótesis adicional que solamente a primera vista parece ser incompatible con el principio de la relatividad.”

Así pues, las medidas se pueden hacer desde diferentes marcos de referencia, el marco de referencia se refiere a un sistema de coordenadas desde el cual se hace la medida, se puede medir el espacio, el tiempo o velocidad que se encuentre en el mismo sistema de coordenadas o se puede medir algo en otro sistema de coordenadas que se encuentre en movimiento relativo con respecto al primero. En otras palabras, el principio de relatividad enuncia que para un eje coordenado que se mueva respecto a otro y cuya traslación sea uniforme y sin rotación, se cumplirán en estos dos las mismas leyes físicas generales.

Según como lo planteaba Einstein, al ser todos los marcos equivalentes debe haber entonces, unas reglas de transformación para pasar de un marco a otro, y estas debían asegurar el cumplimiento de las leyes físicas, en palabras de Einstein (1998) *“...una ley de transformación muy concreta para las magnitudes espacio-temporales de un suceso al pasar de un cuerpo de referencia a otro”*

Las coordenadas de Lorentz, que complementan las ideas de las coordenadas cartesianas, contienen las consideraciones necesarias para describir los eventos analizados por dos observadores en movimiento relativo, uno con respecto al otro, es decir, en marcos de referencia

distintos. Para el marco de referencia en movimiento se denotan coordenadas primadas, y para el marco de referencia en reposo se denota sus coordenadas no primadas.

$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$	$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$
$y' = y$	$y = y'$
$z' = z$	$z = z'$
$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$	$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$

En las transformaciones de Lorentz, el tiempo en un sistema de referencia está ligado tanto a las coordenadas espaciales como a la velocidad relativa del sistema de referencia con respecto al observador y adicionalmente a la velocidad constante de la luz, así, en esta transformación el tiempo pierde la independencia con el espacio, lo cual era un rasgo característico en la mecánica clásica.

Con la introducción de las transformaciones de Lorentz, los observadores determinan las mismas distancias y duraciones entre cualquier conjunto de eventos, sin importar las consideraciones que se hagan sobre estas.

Toda ley general de la naturaleza tiene que estar constituida de tal modo que se transforme en otra ley de idéntica estructura al introducir, en lugar de las variables espacio-temporales x, y, z, t del sistema de coordenadas original K , nuevas variables espacio-temporales x', y', z', t' de otro sistema de coordenadas K' , donde la relación matemática entre las cantidades con prima y sin prima viene dada por la transformación de Lorentz. Formulado brevemente: las leyes generales de la naturaleza son covariantes respecto a la transformación de Lorentz” Einstein, A. Grünbaum, A. Eddington, A. y otros. (1995).

La covarianza de la cual habla Einstein aquí hace referencia a la característica de las ecuaciones, o leyes físicas, en mantener su forma bajo los cambios de coordenadas, con el fin de que se cumpla el primer postulado que compone la teoría especial de la relatividad

3.1.5. Consolidación del concepto espacio-tiempo

Con el establecimiento de la teoría especial de la relatividad, el espacio y el tiempo quedaron ligados, tal como se puede mostrar a través de las transformaciones de Lorentz, en este sentido, el espacio y el tiempo no son entidades físicas independientes, si no son componentes de una medida en la cual para medir el tiempo hay que considerar el espacio y para medir el espacio es necesario considerar el tiempo, es decir que, no son independientes uno del otro como en el caso de la mecánica clásica, es así, que en la teoría especial de la relatividad se constituye el concepto de espacio-tiempo ligado a la medida.

A diferencia de la mecánica clásica, en la relatividad no se buscaba describir la posición de los objetos en el espacio sino los sucesos que se encontraban en el espacio-tiempo. Es Minkowski quien introdujo un nuevo espacio métrico que enmarcaba esta nueva definición, así pues, propuso una red tetradimensional (espaciotemporal), siendo esta una forma gráfica de representar las transformaciones de Lorentz además permite ver la línea de universo de un objeto, es decir, la evolución espaciotemporal.

3.1.6. Consecuencias de la TER

A partir de la introducción del espacio-tiempo, surgen dos consecuencias ligadas a la medición cuando se consideran velocidades, en los marcos de referencia, cercanas a la velocidad de la luz, la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud.

La dilatación del tiempo hace referencia a la medición que hace un observador del tiempo transcurrido entre dos eventos, cuando dicha medición se realiza en un marco de referencia en movimiento, se encontrará que es distinta a la medición hecha en un marco en reposo, el observador que se encuentra en el marco de referencia en movimiento medirá tiempos mayores, es decir que para este el tiempo se habrá dilatado.

Así mismo, la contracción espacial hace referencia a la medida que se realiza sobre un objeto, en donde la medición hecha en un marco de referencia en movimiento es más corta que la

longitud propia, es decir, la medición hecha en el marco de referencia en reposo, en este sentido el primer observador medirá longitudes más pequeñas que el observador en reposo

Cabe resaltar aquí, que estas consecuencias surgen a partir de las consideraciones que se hacen con respecto al movimiento de los marcos de referencia. En este sentido, en los diferentes cursos de introducción a la relatividad, cuando se abordan las consecuencias de la teoría especial de la relatividad, según la perspectiva subjetiva del estudiante, se llega a interpretaciones erróneas de estas consecuencias. Por un lado, se considera que la naturaleza propia del espacio y el tiempo cambia cuando se consideran velocidades cercanas a la luz, y a partir de esto, suele verse esta teoría como la mecánica de los cuerpos que se mueven a grandes velocidades. Este tipo de interpretaciones se dan, puesto que no existen momentos para la reflexión en donde se señale las implicaciones reales estas dos consecuencias; así mismo, no se hace hincapié en que estas surgen a partir de la medida y no de la naturaleza del objeto o evento.

4. SOBRE LAS DISCUSIONES PEDAGÓGICAS

Durante las últimas décadas se han realizado investigaciones y publicado artículos sobre el papel y la importancia que tiene la historia y filosofía en la formación de maestros de ciencias. Y si bien, son aspectos que deberían estar presentes en la formación de maestros, también debería considerarse para cualquier tipo de formación tanto como universitaria y secundaria.

4.1. La importancia de los estudios histórico- filosóficos para la enseñanza de las ciencias

Cuando la ciencia es abordada en diferentes espacios académicos, suele ser llevada como un producto, es decir, se ve como un resultado y se omite de esta su pasado y futuro. Las diferentes investigaciones que se han realizado, en donde se buscan el interés en la ciencia por parte de los estudiantes ponen de manifiesto la importancia de la inclusión de aspectos temporales *“la Historia de las Ciencias permite comprender de mejor manera las relaciones que se establecen entre las diversas acciones que confluyen en la actividad de ‘hacer ciencia’”* Izquierdo, M. Garcia, A. Quintanilla, M. Aduriz, Agustin. (2016)

La intención de incluir la filosofía y la historia dentro de la enseñanza de la ciencia lleva más de un siglo gestándose, así mismo, se han realizado distintas implementaciones de estos enfoques en medio de la enseñanza de las ciencias, lo que ha permitido que diferentes autores cuestionen y planteen la importancia de la historia y filosofía en el que hacer docente.

La historia y la filosofía dentro de la enseñanza de las ciencias, permite construir un panorama más amplio en torno al reconocimiento del contexto en el cual surgen las teorías, la ciencia responde a distintos factores sociales, políticos, culturales, entre otros. Un autor bastante famoso en este ámbito, Michael R. Matthews, reconocía que, si bien la educación se beneficia constantemente de libros e investigaciones con bases históricas y filosóficas, se habla muy poco de la relación entre filósofos e historiadores y educadores científicos. Así pues, la poca comprensión de las ciencias ha generado a lo largo de los años el desinterés y abandono de aquellas asignaturas relacionadas directamente con las ciencias.

Curiosamente Ernst Mach mostró interés por elementos de la pedagogía científica *“No conozco nada más terrible que las pobres criaturas que han aprendido demasiado. Lo que han adquirido es una telaraña de pensamientos demasiado débil para sostener postulados sólidos,*

pero con la complicación suficiente para producir confusión” Matthews, M. (1991). Aquí, Mach realiza un crítica a la poca profundización que hay frente a lo que se enseña y sin embargo ha pasado más de un siglo y aún se mantienen vigentes las discusiones frente a la forma de transmitir conocimiento.

La asociación británica para la educación científica señalaba que el desinterés frente a la ciencia, era debido a los profesores puesto que no comprendían o no tenían gran interés por la naturaleza de la ciencia *“Muchos actúan y piensan científicamente como resultado de su preparación, pero carecen del entendimiento de la naturaleza básica y propósitos de la ciencia”* (Association for Science Education, 1963, p13) así pues, proponen que la ciencia debía ser reflejada como una actividad cultural, en donde se incluyera aspectos históricos, filosóficos y sociales, para que de esta forma el docente estuviera con la capacidad de construir y llevar a los alumnos un panorama más completo de la ciencia, *“la búsqueda más generalizada de la cultura y el conocimiento científico que toma nota de las implicaciones, filosóficas y sociales de las actividades científicas y, por lo tanto, lleva a un entendimiento de la contribución que la ciencia y la tecnología hacen a la sociedad y al mundo de las ideas”* Matthews, M. (1991).

Inicialmente se habla de incluir la historia y la filosofía dentro de la enseñanza de las ciencias para la formación de docentes, ya que esto permitiría estar en la capacidad para poder llevar a los alumnos a construir un panorama más acertado de la ciencia.

A comienzos del siglo XX, Pierre Duhem insistía en la urgencia de implementar el método histórico en la enseñanza de la física *“El método legítimo, seguro y provechoso, de preparar al alumno para recibir una hipótesis de física es el método histórica... describir la larga colaboración por medio de la cual el sentido común y la lógica deductiva analizaban la materia y modelaban aquella forma hasta que una se adaptaba exactamente a la otra. Es la mejor manera, seguramente la única, de dar a quienes estudian física una visión correcta y clara de la organización real y altamente compleja de esta ciencia”* Matthews, M. (1991). aquí se pone de presente que la historia es un factor que permite preparar al estudiante para la asimilación de teorías. Por ejemplo, el físico Gerald Holton en la Universidad de Harvard desarrolló un curso llamado “Curso de física proyecto Harvard”, en este curso se pudo reconocer como la historia de la ciencia puede contribuir al desarrollo de cursos científicos. Fue el único curso que consideraba la historia y el contexto cultural de la ciencia. Los estudiantes no aprendían desde lo matemático

y procedimental, sino que reconocían los distintos factores que hacían parte de la física. A partir del éxito en el desarrollo del curso, en la formación de docentes en Estados Unidos, se asegura que los profesores tengan buenos fundamentos de historia y filosofía de la ciencia.

Siguiendo esta línea de trabajo de la importancia de los estudios históricos, existe una relación directa con la lectura de fuentes primarias y las consideraciones históricas, es decir, la historia está relacionada con aquellos escritos que describían exactamente los desarrollos experimentales o teóricos que se dieron en su momento. Por ejemplo, Frederick William Sanderson director de la Escuela Oundle, les aconsejaba a sus estudiantes leer fuentes primarias puesto que estos era parte integrante del desarrollo de la cultura de la ciencia. *“Leed a Arquímedes... leed los artículos de Faraday... seguid los largos procesos de los experimentos, la diversidad de los métodos, los intentos y fracasos, incertidumbre, dudas y provocación, el ambiente del descubrimiento”* Matthews, M. (1991).

Frederick insiste en que, a través de esta visión, puede caerse en una interpretación simplista y unidireccional, en donde se puede llegar a pensar que solo hay una única historia de las ciencias. En el caso específicamente de la teoría general de la relatividad, cuando es abordada en los distintos cursos, se le atribuye únicamente a la genialidad de Einstein el planteamiento de esta teoría, ignorando todas las discusiones que se llevaron a cabo antes de él.

A pesar de las distintas insistencias de incluir la filosofía dentro de la enseñanza de las ciencias, no existía entonces una participación de los filósofos directamente en la educación. Matthews, por ejemplo, pensaba que aquellas definiciones que se exponen en clases de física, tales como la aceleración, la cual suele definirse como el cambio de la velocidad con respecto al tiempo, se podría transformar si existieran preguntas sobre la relación de la teoría con los hechos, de la forma en que se realizan los experimentos o demás factores en el establecimiento de esta definición.

En este sentido los estudiantes deben hacerse constantemente preguntas sobre los modelos, sobre la veracidad de estos, su utilidad y los aspectos que convierten en una afirmación en verdadera o si estas solo funcionan para casos ideales, además la importancia de constatar la relación entre la experimentación y el establecimiento de las teorías.

Se puede fácilmente caer en el error de pensar que incluir las discusiones filosóficas de la ciencia es lo mismo que enseñar filosofía *“El objeto no es enseñar filosofía, sino potenciar el aprendizaje y favorecer una mayor conciencia de la excitación intelectual y los logros de la ciencia. Verla como una actividad cultural que afecta a otras áreas de la vida y se ve a su vez afectada e influenciada por ellas.”* Matthews, M. (1991).

En este sentido se requiere direccionar la investigación y los análisis de los diferentes libros y programas académicos que permitan generar en los estudiantes interés hacia la relatividad, y la ciencia en general.

4.2. La recontextualización de saberes

La enseñanza de las ciencias, independientemente del escenario en la cual se desarrolle debe permitir abordar distintos aspectos de orden histórico, siendo estos los planteamientos, epistemológicos, filosóficos y sociales que dieron paso a la consolidación de explicaciones que describieran el mundo físico.

La inclusión de la historia y la filosofía permite reconocer los contextos en los que se desarrollaron las ciencias, aunque son reflexiones que se omiten, hay que reconocer que la física, y la ciencia en general, permite evidenciar que esta ha respondido a las exigencias particulares de distinto orden de conocimiento, sociales, políticos, entre otros.

El fin de los estudios histórico-críticos es permitir ver el pasado de la física teniendo en cuenta una visión actual, sin embargo, esta visión no interviene en la esencia conceptual de la misma. María Mercedes Ayala afirmaba que *“basados en el análisis de textos elaborados por pensadores que contribuyeron de manera significativa a la consolidación de la física (análisis de originales). Los estudios histórico-críticos son en sí mismos procesos de recontextualización de los saberes científicos”* (Ayala, 2006). Así pues, la autora expone una problemática presente en la formación de maestros, en donde se aprende por un lado los contenidos curriculares y por otro lado se abordan las discusiones epistemológicas de la ciencia. No ha habido entonces, una reestructuración sustancial que permita poner fin a esta contradicción.

Es importante aquí hablar del rol que cumple el docente como orientador dentro de su labor pedagógica, en este sentido, cuando los docentes en formación consideran aspectos de orden epistemológicos, históricos y filosóficos, adicionalmente del aspecto matemático y pedagógico, se

llega a una conceptualización más elaborada de las teorías presentes en la física. Así pues, esto permite hablar reconocer que la recontextualización pone en diálogo contextos y demás factores fundamentales propios en el planteamiento de las teorías.

Bajo estas reflexiones de orden pedagógico, se logra reconocer que la forma en la cual se desarrolló el presente trabajo enmarca el contexto propio del surgimiento de la teoría especial de la relatividad, al mostrarse que esta surge para dar solución a problemas propios de la medición de los fenómenos, y no como respuesta a problemas en las teorías como suele creerse; para ello fue necesario, examinar cómo Einstein transformó las concepciones clásicas del espacio y tiempo, siendo estos dos conceptos claves para la postulación de su teoría. Si bien, la teoría especial de la relatividad se estableció en un contexto físico-matemático, se evidencia que para el entendimiento de esta se puede recurrir a otro tipo de reflexiones, más allá de los desarrollos matemáticos dispendiosos.

5. CONCLUSIONES

Los conceptos de espacio y tiempo han suscitado múltiples reflexiones tanto filosóficas como físicas. Particularmente en la física, estos conceptos han estado marcados por una tensión entre las ideas de espacio y tiempo absolutos, y espacio y tiempo relativos, la concepción de estos como absolutos, también implica atribuirles a estos un carácter de existencia como objetos físicos, en tanto que las concepciones relativas de estos se refieren únicamente a relaciones entre los objetos y los eventos, las cuales pueden ser medidas.

La controversia que han suscitado las concepciones de espacio y tiempo han dado lugar a reflexiones filosóficas, las cuales también han impactado el pensamiento científico, ya sea a manera de crítica de las teorías físicas o constituyéndose como base para los planteamientos de la ciencia; este es el caso de las reflexiones filosóficas en torno a las concepciones de espacio y tiempo, establecidas por Hume y Mach, las cuales plantean fuertes críticas al espacio y tiempo absolutos newtonianos, y estas concepciones sirvieron de base para el planteamiento de la teoría especial de la relatividad por parte de Einstein.

La teoría especial de la relatividad plantea un rompimiento con la mecánica clásica al incluir como bases fundamentales de sus planteamientos reflexiones de corte filosófico, en torno a los conceptos de espacio y tiempo. Esta teoría surge como solución a las problemáticas que implica la aplicación de las leyes de la mecánica a fenómenos electromagnéticos, es decir, las problemáticas en torno al principio de causalidad que implicarían las leyes de la física, esto condujo a la necesidad de plantear modificaciones profundas a los conceptos fundamentales de la mecánica, espacio y tiempo, tales modificaciones implican también nuevas consecuencias en relación con el espacio, tiempo y movimiento, los cuales son entendidos en la teoría especial de la relativa desde una perspectiva de la medida.

Las reflexiones en torno a la teoría especial de la relatividad que se hacen en el presente trabajo le apuestan a una primera parte de contextualización fundamental en la labor docente, son en estas reflexiones en donde se intenta entender que pasa con la enseñanza de la física dentro del aula. Si bien la enseñanza está compuesta de distintos factores estas primeras reflexiones permiten que el docente profundice y cree una visión amplia e integral del conocimiento físico que se lleva

al aula, además permite y posibilita la estructuración de propuestas para la enseñanza de la física en los diferentes niveles.

Por último, es importante señalar que, para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad, especialmente en los niveles básicos se hace necesario hacer consideraciones en torno a las bases filosóficas de dicha teoría, como son los planteamientos de Hume y Mach, además de poner de presente las problemáticas físicas en relación con el principio de causalidad, las cuales dieron a origen a esta teoría.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, M. M. (2006). Los análisis histórico-crítico y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. *Pro-Posições*, Campinas, SP, v. 17, n. 1, p. 19–37.

Einstein, A. (1998). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. Madrid: Alianza

Einstein, A. Grünbaum, A. Eddington, A. y otros. (1995). *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. La teoría de la relatividad: Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*. (pp. 6(1-67)). Alianza Editorial.

Feynman, R. (2014). Seis piezas fáciles. La física aplicada por un genio. En R. Feynman, *Seis piezas fáciles. La física aplicada por un genio* (págs. 33-34). Barcelona: Crítica S. L.

Gimbel, S., & Walz, A. (2006). The Philosophical Significance of the Theory of Relativity. In H. Reichenbach (Author) & S. Gimbel & A. Walz (Eds.), *Defending Einstein: Hans Reichenbach's Writings on Space, Time and Motion* (pp. 95-160). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511584572.011

Gordillo Chaparro, L. A. (Julio de 2018). *Análisis comparativo del concepto de espacio en la teoría clásica y relatividad especial*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.

Guridi, V. Arriasecq, I. (2004). Historia y filosofía de las ciencias en la educación polimodal: propuesta para su incorporación al aula. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 3, p. 307-316.

Hume, D. (1740). *Tratado de la naturaleza humana*. Traducción del inglés por Vicente Viqueira (2001). Libros en la red.

Izquierdo, M. Garcia, A. Quintanilla, M. Aduriz, Agustin. (2016)

Mach, E. (1919). *The science of mechanics. A critical and historical account of its development*. Translated from the German by Thomas J. McCormack. London: The Open Court Publishing Co.

Martínez, J. (2012). *Herramienta didáctica para la enseñanza de algunos conceptos de relatividad especial partiendo de un evento de naturaleza electromagnética*.

Matthews, M. (1991). Un lugar para la historia y filosofía en la enseñanza de las ciencias. *Comunicación, Lenguaje y educación*, 141-155.

MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL (2006). Estándares básicos de competencias.

Moreno, A. (2006). ATOMISMO versus ENERGETISMO: Controversia científica a finales del siglo XIX. *Historia y epistemología de las ciencias*.

Munevar, C. (2019). Las ecuaciones de maxwell: una estrategia tecnológica para abordar fenómenos que relacionan la relatividad especial con el electromagnetismo.

Ortiz, E. (2017). Los conceptos del espacio-tiempo entre Newton y Einstein para la enseñanza de la física. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.

Pérez, H. Solbes, J. (2006). Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física. *Enseñanza de las ciencias*.

Quevedo H. (2005). Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento. Traducción “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”. *Annalen der Physik*, 17, 891–921 (1905). Recuperado de <http://webs.ftmc.uam.es/juancarlos.cuevas/Teaching/articulo-original.pdf>

Restrepo Restrepo, G. (2011). *Relatividad especial: fundamentos y propuesta didáctica para su enseñanza en la escuela secundaria*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional.

Sierra Pareja, A.Y. (2014). *Análisis introductorio para la comprensión del segundo postulado de la teoría especial de la relatividad*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.

Vargas Moreno, E. S. Barrera Mendivelso, E. J. (2016). *Análisis de la falta de simetría del electromagnetismo clásico y su solución relativista: tensor de campo electromagnético*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Pedagógica Nacional https://www.academia.edu/9475716/Estándares_Básicos_de_Competencias