



UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL
Educadora de educadores

MONOGRAFÍA DE PREGRADO:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONCEPTO DE ESPACIO EN LA TEORÍA
CLÁSICA Y RELATIVIDAD ESPECIAL.**

AUTOR:

LEONEL ALEXIS GORDILLO CHAPARRO.

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL U.P.N

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA.

LICENCIATURA EN FISICA.

BOGOTÁ D.C

JULIO DE 2018



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL
Educadora de educadores

MONOGRAFÍA DE PREGRADO:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONCEPTO DE ESPACIO EN LA TEORÍA
CLÁSICA Y RELATIVIDAD ESPECIAL.**

AUTOR:

LEONEL ALEXIS GORDILLO CHAPARRO.

Documento de Monografía para optar al título de Licenciado en Física

DIRIGIDO POR:

YESID JAVIER CRUZ BONILLA.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL.

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA.

LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN:

LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN FÍSICO MATEMÁTICA.

BOGOTÁ D.C


2018

Agradecimientos

En el transcurso de mi carrera y de mi vida he compartido buenos y malos momentos como todo ser humano, conllevando a valorar y apreciar lo que se me ha presentado. En este camino he construido ciertos valores y principios que se ven reflejados en mi formación personal y académica. Por eso por medio de la presente me dirijo a personas que con mucho y poco empeño han participado en mi formación.


En primer lugar, quiero agradecerle a mi señora madre Luz Almeida Chaparro y a mi abuelita Luisa Marina Chaparro, mujeres que han formado mi camino con su ejemplo, experiencia y sabiduría, motivo más por el cual seguir construyendo metas y objetivos en mi vida. En segundo lugar, quiero mencionar a mi señor padre Ernesto Gordillo y a mi hermana Luz Angelica quienes me han apoyado emocionalmente con sus buenos consejos logrando así mismo ganar un poco más de madurez para entender ciertos aspectos de la vida.

Por otra parte, quiero agradecer a los profesores y compañeros que han sido como mi segunda familia, colaborándome con mi formación personal y profesional. Y, por último, quiero agradecer a mi novia Ana María por ser un apoyo incondicional en mi vida.


 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Universidad de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 7	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Análisis comparativo del concepto de espacio en la teoría clásica y relativista especial.
Autor(es)	Gordillo Chaparro, Leonel Alexis
Director	Cruz Bonilla, Yesid Javier
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2018. 66p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	ESPACIO; ESPACIO-TIEMPO; GEOMETRÍA; SIMULTANEIDAD; FILOSOFÍA.


2. Descripción
<p>El concepto de espacio es uno de los conceptos que ha sido ampliamente estudiado, investigado y debatido por múltiples filósofos, físicos y matemáticos destacados desde la antigüedad, con el objetivo de lograr demostrar uno de los principios fundamentales que permite asentar la explicación de los fenómenos naturales. La noción de espacio a trascendido por varios contextos filosóficos y matemáticos percibiendo y detallando relaciones que perciben distintas orientaciones que proceden de la experiencia, por tal razón se hace indispensable analizar y ser estudiado de manera de reflexión el presente trabajo de investigación.</p> <p>En ese orden de ideas, el presente trabajo tiene como objetivo fundamental realizar un análisis comparativo, acerca del concepto de espacio desde el contexto clásico y desde el contexto de la Teoría Especial y de la Relatividad, considerando la configuración del espacio/tiempo como un concepto indispensable.</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Formación de Profesores</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 7	

3. Fuentes
[1] Álvarez Toledo Sebastián. (2008). Causalidad y tiempo: el sentido de una reducción. Teorema, XVII, 2942.
[2] Arancibia Peña, Vicente. (2016). El concepto de espacio en Descartes una revisión sintética en vistas de desbanalizar el uso del concepto de espacio. Artículo. Facultad de arquitectura. Instituto de filosofía PUC.
[3] Blanco, Carlos. (2005). Leibniz y la teoría de la relación. Themata revista de filosofía
[4] Carnap Rudolf. (1969). Causalidad y determinismo. En Fundamentación lógica de la física (249-296). Buenos Aires: Sudamericana.
[5] D`Inverno Ray. (1992). Introducing Einstein´s Relativity. New York: Oxford University.
[6] Descartes, Rene. Meditaciones acerca de la filosofía primera, en las cuales se demuestra la existencia de Dios, así como la distinción real entre el alma y el cuerpo del hombre. Traducido por Peña, Vidal. (2011). Editorial KRK Ediciones.
[7] Einstein, Albert. (1905). Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.
[8] Friedman, M (1992). Kant and the exact sciences. Cambridge, Mass, Harvard University press.
[9] French. (1974). Relatividad Especial, Curso de física del MIT (Massachusetts Institute of Technology). New York: Reverté S.A.
[10] Garces, Marina (2005). Leibniz, o la arquitectura de un mundo solo. Themata. Revista de filosofía.
[11] Garcia Morente, Manuel (1980). Lecciones preliminares de la filosofía. Editorial Porrúa. Novena Edición.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Encuentro de saberes</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 7	

- [12] Granés Sellares José. (2005). Isaac Newton Obra y contexto. Una introducción. Bogotá D.C: Editorial.Ltda.
- [13] Guerrero Pino, German (2010). Einstein: científico y filósofo. Universidad del valle Programa Editorial.
- [14] Hawking, S & Ellis, G. (1973). The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge University: Cambridge University Press.
- [15] Hernandez, Luis Esteban. (2017), Estructura causal de la solución de kerr (*tesis de pregrado*), Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C, Colombia.
- [16] Jammer, M. (1982). Concepto de espacio. New York, Dover publications, INC.
- [17] Janssen Bert. (2013). Teoría General de la Relatividad. Granada: Universidad de Granada - España, Departamento de física teórica y del cosmos.
- [18] Kaufmann, W. (1977). Relatividad y Cosmología. London: Copyright
- [19] López Posada, Yuly. (2012). Problemáticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría especial de la relatividad con respecto a los maestros en formación de la licenciatura en matemáticas y física de la universidad de Antioquia (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia.
- [20] Mach, Ernst. (1976). Knowledge and error. Sketches on the Psychology of Enquiry. Facultad de Psicología Universidad de Barcelona.
- [21] Minkowski Hermann. (1908). Space and Time: Minkowski Papers on Relativity. Moscú: Minkowski Institute Press.
- [22] Misner, C , Thorne, K & Wheeler, J. (1973). Gravitation. New York: W. H Freeman and Company.
- [23] Newton, Isaac. (1983). Principios matemáticos de la filosofía natural, Madrid: Alianza Editorial.
- [24] Pacheco C. & Pulido A.(2001), *Análisis formal de los conceptos de espacio y tiempo*, Universidad Pedagógica Nacional (tesis de Pregrado), Bogotá D.C, Colombia.
- [25] Pérez, Daniela (2016), *Agujeros negros astrofísicos* (tesis de doctorado en astronomía), Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.
- [26] Quintana, Hernán (2004). Espacio, Tiempo y Universo. Tomo II, Ediciones Universidad Católica de Chile

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Universidad de la Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 7	

[27] Raffo Quintana, Federico (2016). La infinitud actual de partes del continuo en la theoria motus abstracti de Leibniz. THEMATA Revista de filosofía.

[28] Rodríguez, Miguel Ángel (2012), *Estructura causal en el universo cosmológico de Godel (tesis de pregrado)*, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C, Colombia.

[29] Sepúlveda, Alonso (2003). Los conceptos de la física. Evolución Histórica. . Medellín: Universidad de Antioquía.

[30] Sierra Pareja, Andrés. (2014). Análisis introductorio para la comprensión del segundo postulado de la teoría especial de la relatividad (tesis de pregrado), Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C, Colombia

[31] Tejeiro, Juan Manuel. (2004). Sobre la teoría especial de la relatividad. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia - Unibiblos.

[32] Vélez, Fabio. (2012). Apuntes de Relatividad. Bogotá D.C: Corcas Editores SAS.

4. Contenidos


La presente monografía se compone de dos capítulos en los cuales se dará estudio al concepto de espacio.

Contextualización del problema.

Este capítulo está orientado a presentar y exponer el planteamiento del problema de investigación. Inicialmente se realiza un contexto problemático en donde se introduce al lector en la problemática y posteriormente se formula la pregunta problema que se desea resolver. Con base en lo anterior, se formula el objetivo general y los objetivos específicos de la monografía.

Capítulo I: Introducción al concepto de espacio desde el contexto clásico.

El primer capítulo está orientado a explicar el concepto de espacio desde el contexto clásico, retomando autores de alta índole. Inicialmente se hará un breve recuento acerca del concepto de espacio conllevando a explicar cada aspecto importante que está sujeto al concepto, analizando las características y propiedades de la noción de espacio para cada autor, mencionaremos su orientación filosófica y su pensamiento organizado que lo conllevó a estructurar una teoría de espacio y tiempo.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Escuela de Maestría</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 5 de 7	

Capítulo II: Análisis y discusiones sobre el concepto de espacio moderno, Teoría especial de la relatividad.

El segundo capítulo, está orientado a realizar un análisis del concepto de espacio bajo el contexto moderno, explicando sus aplicaciones físicas, geométricas y filosóficas. Demostrando que a partir de esta nueva orientación de la teoría comienza a romper dichos paradigmas encontrados en la época clásica. Por último, se hará una recontextualización de lo mencionado por medio de cuadros comparativos en donde se detalle los aspectos relevantes para cada teoría que menciona cada autor, sirviendo como apoyo para la organización de las conclusiones.

5. Metodología

La Metodología con la cual se orientó el trabajo de investigación, va enfocada directamente desde un contexto problema, en donde se formula una pregunta que guíe la investigación de manera lógica y coherente, a través de un análisis descriptivo y explicativo, con el fin de obtener una mayor riqueza en la información y su interpretación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 1991), teniendo en cuenta que el presente trabajo esta orientado para que el estudiante fortalezca y profundice acerca de los conceptos fundamentales que orientan la Teoría Especial de la Relatividad.


La Presente monografía fue estructurada en cuatro fases, que obedecen de manera óptima y eficaz la metodología mencionada anteriormente. Estas fases son:

Fase 1: Para esta fase el investigador, se vera en la tarea de investigar e identificar los elementos conceptuales del contexto clásico y moderno del espacio.


Fase 2: Identificación del problema teórico que se quiere investigar, en ara de construir un objetivo general y unos objetivos específicos que se irán desarrollando paulatinamente durante la monografía.

Fase 3: Construcción de un marco teórico consistente que se encuentre en coherencia con los antecedentes históricos sobre el tema, acudiendo en lo posible a fuentes primaria como los artículos originales de los autores, etc. Este a su vez se debe ir desarrollando entorno a los objetivos específicos propuestos.

Fase 4: Establecer las respectivas conclusiones del trabajo de investigación. En estas se da respuesta al objetivo general de la monografía y se reflexiona entorno al trabajo y a los objetivos específicos propuestos.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Formación de ciudadanos</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 6 de 7	

1. Conclusiones
<p>a. Las diferentes corrientes filosóficas y metafísicas permiten sesgar y fijar parámetros en donde se puede evidenciar el prototipo del concepto de espacio, evidenciando distintas posturas argumentativas que utilizan para estructurar las teorías acerca del concepto de espacio. En este sentido el carácter clásico y moderno están permeados por una corriente filosófica que organiza el concepto de espacio absoluto o relativo, especificando propiedades y funciones que acontece dicho espacio.</p> <p>b. El concepto de espacio clásico está inmerso en las hipótesis, cuya reunión de nociones se perciben a través de las síntesis teóricas que reflejan el carácter dependiente o independiente de los objetos que lo rodean o que se encuentren en él.</p> <p>c. El espacio Newtoniano y Kantiano obedece los postulados euclidianos estableciendo la homogeneidad y continuidad, revelando la absolutez del espacio ante cualquier argumento a posteriori, considerando que la noción de espacio se presenta de manera a priori e innata de cualquier ente observable o fenómeno natural. Dicho lo anterior y resaltando el carácter isotrópico, se refleja un espacio absoluto igual y equivalente en todas sus partes, recalcando que la acción a distancia (causa-efecto) concebida por cualquier observador es instantánea en cualquier punto del espacio, puesto que el paradigma se estableció y se desarrolló en la teoría de la mecánica clásica, conllevando a formalizar el concepto de espacio independiente y absoluto.</p> <p>d. La teoría de la mecánica clásica evidencia un espacio inmóvil y contenedor de todos los movimientos absolutos y relativos, destacando el espacio en su totalidad como inmóvil y como posibilidad para observar los diferentes movimientos que acontece la naturaleza, pues dicho espacio en constante movimiento no puede diferenciar los distintos movimientos que se representan en la naturaleza, puntualizando en la necesidad de fijar un marco inercial en reposo, como punto de referencia.</p> <p>e. El concepto de espacio moderno (TER) está íntimamente ligado con la ideología racionalista, detallando su carácter dependiente y relacional con los demás entes y fenómenos naturales para detallar la noción de espacio. Concebir un espacio independiente sin relación a la nada, no puede poseer propiedades de extensión para dar explicación de aquella noción.</p> <p>f. La teoría especial de la relatividad establece los marcos inerciales como la medición absoluta de cualquier evento, apoyándose geoméricamente y evidenciando distintos planos de simultaneidad que puede obtener cada observador de acuerdo con su marco de referencia. Se establece que las leyes de la física son iguales para cualquier observador, y la velocidad de la luz es la constante universal para todos los marcos de referencia. Dicho lo anterior, la geometría no-Euclidiana de Minkowski evidencia el comportamiento de simultaneidad a través de los conos de luz designando las líneas del universo para una partícula en reposo o en movimiento en donde se consta que los vértices de dicho cono es el límite de velocidad de la luz.</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Excellence in Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN – RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 7 de 7	

g. El presente trabajo de monografía se ha realizado con el objetivo de hacer una aproximación teórica al concepto de espacio, analizando sus principales características y funciones a través del papel que ha venido desempeñando en la física- Se considera que dicho documento sea un aporte teórico al programa de la licenciatura en física, sirviendo como referente inicial para la construcción de nuevos trabajo que den pie a la discusión sobre las bases que componen la física teórica y experimental, innovando las discusiones posteriores dentro del Departamento De Física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Elaborado por:	Gordillo Chaparro, Leonel Alexis.
Revisado por:	Cruz Bonilla, Yesid Javier.

Fecha de elaboración del Resumen:	23	07	2018
--	----	----	------

Contenido.

	Pág.
Introducción.....	1
Contextualización del problema.	
Planteamiento del problema.....	3
Objetivos	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Capítulo I: Introducción al concepto de espacio desde el contexto clásico.	
1.1 Introducción.....	6
1.1.1 Unas ideas previas de los objetos que residen el espacio en la antigua Grecia	6
1.1.2 Rene Descartes y su noción de espacio, propiedades de la res cogitans y res extensas	7
1.1.3 Leibniz y el concepto de espacio desde una perspectiva racionalista.	14
1.1.4 El espacio absoluto de Isaac Newton.....	17
1.1.5 Kant y su postura frente a las ideas de Newton.	23
Capítulo II: Análisis y discusiones sobre el concepto de espacio moderno, Teoría especial de la relatividad.	
2.1 Introducción.....	28
2.2 Ernst Mach y su concepción de espacio, una relación intrínseca con la materia ..	28
2.3 Minkowski y una interpretación matemática del espacio-tiempo.....	31
2.3.1 Diagramas del espacio-tiempo.....	33
2.4 El auge de la teoría especial de la relatividad y el cimiento del espacio-tiempo.	43
2.4.1 Ideas previas acerca de la teoría especial de la relatividad.....	44
2.4.2 La causalidad y los planos de simultaneidad en la teoría especial de la relatividad	45

2.5 Análisis comparativo del concepto de espacio, tiempo e ideología filosófica	54
2.5.2 Cuadros comparativos	54
Conclusiones	58
Lista de referencias y Bibliografía	61
Sección de anexos:	
Anexo A: Ordenadas y abscisas, sistema coordenado de la antigua Grecia.....	65
Anexo B: Demostración rotaciones y transformaciones invariancia Euclidiana.....	66
Anexo C: Demostración rotaciones y transformaciones Geometría de Minkowski.....	68
Anexo D: Clasificación del intervalo al cuadrado.....	69

Tabla de figuras.

<i>Figura 1.1: Representación gráfica de una sustancia extensa en el espacio</i>	11
<i>Figura 1.2: Representación gráfica del espacio y dos planetas con la misma velocidad</i>	20
<i>Figura 1.3: Representación gráfica del movimiento absoluto y reposo relativo, respecto al espacio inmóvil</i>	22
<i>Figura 2.1: Representación gráfica del experimento de Newton, critica de Ernst Mach</i>	29
<i>Figura 2.2: Representación gráfica de la métrica del punto A y B en un plano de simultaneidad S</i>	34
<i>Figura 2.3: Representación gráfica de la línea del universo de una partícula en el plano (z, x)</i>	36
<i>Figura 2.4: Diagrama espacio-tiempo para un fotón de luz.</i>	37
<i>Figura 2.5: Diagramas de espacio-tiempo, representación de dos marcos de referencia s y s'</i>	38
<i>Figura 2.6: Geometría de Minkowski, género espacial y género temporal, representación de la signatura matemática</i>	42
<i>Figura 2.7: Diagramas de simultaneidad de la mecánica clásica, para dos observadores con diferente posición,</i>	48
<i>Figura 2.8: Representación geométrica de un cono de luz de Minkowski (pasado, presente y futuro),</i>	49
<i>Figura 2.9: plano de simultaneidad para un observador en reposo</i>	51
<i>Figura 2.10: Plano de simultaneidad para el observador A y un observador B</i>	52
<i>Figura 2.11: Plano de simultaneidad para dos observadores A y B</i>	53

Tabla 2.1: Cuadro comparativo entre los modelos de espacio y tiempo para el contexto clásico, una síntesis de la teoría y el pensamiento filosófico55

Tabla 2.2: Cuadro comparativo entre los modelos de espacio y tiempo para el contexto moderno, pensamiento e ideología.....57

Introducción

El concepto de espacio ha sido discutido en el transcurso del tiempo desde diferentes ramas disciplinares, como lo ha sido la filosofía, la matemática y la física, objetivando varias perspectivas y argumentando los roles que lo conforman. Es importante aclarar que la incursión del concepto de espacio está situada en varios contextos y épocas, en donde es difícil abarcar con exactitud muchos de los términos que se ven relacionados desde diferentes ámbitos de estudio. Por consiguiente, me veo en la plena obligación de reducir y aclarar el contexto y la época en la cual voy hacer énfasis.

El presente trabajo estará enfocado en mostrar las diferentes concepciones o definiciones del concepto de espacio, como un breve recuento el trabajo se orientará desde una perspectiva clásica, abordando autores como Descartes, Leibniz, Newton y Kant hasta llegar al entendimiento del concepto de espacio moderno, explicando las principales ideas de Mach, Minkowski y Einstein. De acuerdo con lo anterior, se retomará trabajos y pensamientos los cuales condujo a estructurar la teoría y el entendimiento del concepto.

Por lo tanto, la presente monografía se compone de dos capítulos en los cuales dará estudio al concepto de espacio. El primer capítulo estará enfocado en dar una explicación desde el contexto clásico, realizando una breve introducción de dicho concepto. Como punto de partida se dará inicio con el pensamiento del autor Rene Descartes, que por medio de sus interpretaciones geométricas y sus discursos racionalistas de alta índole influenciaron el pensamiento de varios autores de talla, como lo fue Sr. Isaac Newton, Gottfried Wilhelm Leibniz e incluso al gran filósofo Immanuel Kant, proyectándolos a reflexionar y construir nuevas teorías que darían pie a la discusión del concepto de espacio. Prosiguiendo con este preámbulo se abre paso al segundo capítulo.

El segundo capítulo estudiará en detalle el contexto moderno que está regido por una de las grandes teorías que enmarcan el inicio de un nuevo pensamiento filosófico y matemático, que es la Teoría Especial de la Relatividad. El concepto de espacio para la teoría moderna se ve inmerso y dependiente del tiempo llamándose así mismo espacio-tiempo, enfocándonos en su geometría y en el análisis daremos cuenta el comportamiento de dicho fenómeno a estudiar. Es importante aclarar que la teoría de la relatividad está dividida en dos partes, la primera parte es una de las grandes hazañas del genio Albert Einstein (1879-1955) que fue la TER (Teoría Especial de la relatividad)

publicada en el año 1905 y la segunda obra que concreto la estructura del espacio-tiempo que es la TGR (Teoría General de la relatividad) publicada en el año 1916. Este capítulo profundizara más sobre la teoría especial de la relatividad, especificando conceptos relacionados al estudio de la noción del espacio, como consecuencia el análisis de los planos de simultaneidad y los conos de luz como ruta para entender el concepto principal en el que se basa el trabajo de grado.

De acuerdo con lo anterior, se establecerá cuadros comparativos para su análisis y se deducirá sus respectivas conclusiones obtenidas en el transcurso del trabajo de investigación, como resultado se verificará la importancia que adquiere el concepto y su interpretación vista por la física clásica y la física moderna, defiriendo de dichos contextos en las que emergen.

Contextualización del problema:

Planteamiento del problema:

El auge de la física moderna como lo es la teoría de la relatividad especial supone una formulación nueva de los conceptos clásicos de espacio y tiempo que son muy potentes, arraigadas en la mente y en la psicología humana (Pérez y Solbes, 2003).

El cambio conceptual y la renovación de varios conceptos en la física han evolucionado en todos sus aspectos, innovando ideas y teorías que rompen paradigmas involucrados con un contexto histórico y social. En este sentido, evidenciar las distintas posturas clásicas entorno a autores reconocidos es indispensable y necesario para formalizar las nuevas concepciones de las teorías modernas de la física, en este caso la teoría especial de la relatividad.

La concepción clásica a través de autores reconocidos como Descartes, Leibniz, Newton y Kant proponen teorías e ideas que están enmarcadas en un contexto disciplinar filosófico, matemático y físico, donde el concepto de espacio prevalece como absoluto e independiente de todo objeto de acuerdo con la mecánica clásica, proponiendo un concepto homogéneo, igual y equivalente en todos sus puntos. En este sentido, la TER¹ nace mucho después de las concepciones clásicas, proponiendo cambiar el paradigma absolutista, innovando teorías que comprenden el espacio de forma relativa y dependiente de los fenómenos naturales.

Es importante resaltar el papel que desempeña la teoría especial de la relatividad de acuerdo con el concepto de espacio, y su relación con el segundo postulado de la constancia de la velocidad de la luz, dando origen a la idea de un espacio intrínseco y dependiente del tiempo que denominaría Einstein espacio-tiempo. La interpretación del segundo postulado de la TER conllevó abrir y explicar nuevos conceptos que fortalecieron la teoría, considerando pertinente el estudio de este tema en la disciplina de la física.

De acuerdo con lo anterior, el concepto de espacio y el reconocimiento de su cambio conceptual en un contexto clásico y moderno es pertinente abordarlo, analizando diferentes ideas,

¹ De ahora en adelante se utilizará las siglas TER, que significa teoría especial de la relatividad.

posturas e hipótesis que llevan a concretar las teorías físicas. El interés por el estudio del concepto de espacio nace de una motivación personal, teniendo en cuenta los cursos vistos en la universidad como soporte y anclaje a otras temáticas y áreas de la física como lo es el análisis comparativo del concepto de espacio.

El papel básico desempeñado por el conocimiento de los estudiantes indica que el genuino proceso de aprendizaje en el ser humano procede, no por acumulación simple de conocimientos, sino por sustitución de los conceptos antiguos por los nuevos, en el caso particular de la transición de la física Aristotélica a la física Newtoniana o de la física clásica a la relatividad (Alemañ, 2000). Estos procesos cognitivos destacan la importancia que las ideas aprendidas formen cadenas significantes² (Vygotsky, 1987) representando el significado del aprendizaje como cambio conceptual llevado a cabo por los propios estudiantes bajo la supervisión del docente, como un proceso de encadenamiento de sucesivos cambios conceptuales a medida que el alumno progresa en su desarrollo intelectual y cognitivo (Laburu, 1996).

A partir de lo anterior, el presente trabajo pretende mostrar el concepto de espacio bajo dos contextos, uno clásico absoluto e independiente, y por otro lado uno moderno relativo dependiente del tiempo (espacio-tiempo). El objetivo principal es realizar un cuadro comparativo donde se pueda evidenciar las diferentes posturas e ideas acerca del concepto de espacio, detallando aspectos importantes que conllevan a estructurar las teorías que establecen. Con base en lo previamente escrito, se formula la siguiente pregunta de investigación. ¿Es posible a través de un análisis comparativo entre la teoría clásica y teoría especial de la relatividad, evidenciar el cambio del concepto de espacio?

² Cadenas significantes: ideas aprendidas que forman conexiones y relaciones activas con el concepto asimilado.

Objetivos

Objetivo general:

- ✓ Realizar un análisis comparativo entre la teoría clásica y teoría especial de la relatividad indicando las transformaciones conceptuales de la idea de espacio.

Objetivos específicos:

- ✓ Describir el concepto de espacio y sus definiciones en la teoría clásica.
- ✓ Describir conceptualmente y matemáticamente las principales características del espacio para la Teoría Especial de la Relatividad.
- ✓ Comparar las ideas clásicas y relativistas.

Capítulo I

Introducción al concepto de espacio desde el contexto clásico

El siguiente capítulo se enfocará en entender la definición de espacio desde la perspectiva de uno de los padres de la filosofía clásica como lo fue Rene Descartes, tratando de estructurar cada explicación acorde a su pensamiento. Luego, procediendo en dar explicación del concepto de espacio para Descartes nos involucraremos en detalle con el significado de espacio para el filósofo y matemático Gottfried Wilhelm Leibniz quien criticó y aportó ideas al entendimiento del espacio desde la perspectiva racionalista, objetivando y criticando varias posturas acordes al concepto de espacio. Continuando con esta ruta se mencionará varias afirmaciones e hipótesis que hace el físico Sr. Isaac Newton acerca del espacio, aclarando que residimos en un espacio absoluto e independiente de todo fenómeno observado, y para acabar este capítulo se mencionara a Immanuel Kant, filósofo muy importante de la edad clásica quien afirma varias ideas e hipótesis de Newton, concretando que es ciencia y sustentando la noción de espacio.

1.1.1 Unas ideas previas de los objetos que residen el espacio en la antigua Grecia

El estudio del espacio ha trascendido con el pasar de los años enmarcado por distintas épocas y contextos, obteniendo diferentes explicaciones por diversas culturas y diferentes ramas de estudio. El estudio del concepto de espacio se acentúa por el reconocimiento del lugar y las propiedades que lo componen para sustentar las cosas materiales que están dadas en el espacio, ese espacio que residimos pero que no conocemos. Desde la edad antigua hasta la edad moderna varios filósofos naturales han propuesto varias soluciones para entender el espacio que está sustentado de percepciones e intuiciones que nos hacen observar y sentir los objetos dados. Por ejemplo: desde la edad antigua con el gran filósofo Aristóteles (384 a. C -322 a. C) empieza a clasificar lo que existe y lo que no existe, hablando del ser como substancia existente con características

indisolubles, pues para Aristóteles³ toda substancia existente tiene que estar conformada por materia y forma, una dependiente de la otra, si la materia carece de forma entonces el objeto no existiría, igualmente la forma sin materia, pues para esta clasificación de lo que existe y lo que no, coloca de ante mano a los objetos existentes sujetos a una ley lógica de la identidad del ser y del pensar. Es importante aclarar que Aristóteles deja a un lado la explicación del concepto (logos) de espacio haciendo énfasis en la identidad de los objetos materiales. Por lo tanto, la explicación o definición del espacio para Aristóteles no está entrañada desde su postura. Es primordial decir que toda lógica está compuesta por ciertas hipótesis que son deducidas por la percepción y la intuición que nos dan a entender los fenómenos naturales.

La noción de las cosas que residen el espacio no solamente está arraigada a varias ideas Aristotélicas ni de los antiguos filósofos naturales de la antigua Grecia como lo fue Parménides de Elea (530 a. C – 515 a. C), primera persona en aplicar el método deductivo a la realidad, sino que trascendieron más allá, hasta llegar al gran filósofo prusiano Immanuel Kant (1724-1804) quien estructuró la idea de espacio a priori independiente de toda experiencia. Nos daremos cuenta de que la definición de espacio y de los objetos que se encuentran en él, va a incursionar hasta nuestro tiempo actual, debatiendo diversas ideas que se dan desde diferentes corrientes filosóficas y científicas, las cuales son argumentadas como un sustento para dar a entender dicho fenómeno natural a estudiar.

1.1.2 Rene Descartes y su noción de espacio, propiedades de la “res cogitans” y “res extensas”.

El concepto de espacio para el autor René Descartes está enmarcado en dos ramas, la primera es el reconocimiento del espacio físico y sus detalles de cómo lo concibe por medio de intuiciones y sensaciones, y la segunda es una explicación desde una perspectiva matemática con estructura lógica conllevando a entender la realidad desde un lenguaje escrito y estructurado. El

³ Aristóteles discípulo de Platón con ideología parmenidica y socrática, inculcaron el estudio de la geometría para entender varios elementos vistos en la cotidianidad. En este caso para Aristóteles la materia está hecha de un algo que llena la materia, simplemente ese algo que la llena es la misma materia. Por otra parte, la forma está contenida en la figura, de igual modo la figura con la forma, obteniendo las diferentes representaciones geométricas. Esta introducción fue construida con base al libro: lecciones preliminares de la filosofía de Manuel García Morente – novena edición- lección VIII, metafísica realista, p.86.

filósofo y matemático René Descartes (1596-1650) empezó a profundizar sobre aquellos aspectos que estaban inmersos en la realidad física, cuyos significados y reflexiones está en su más celebre publicación “*meditations metaphysiques*” publicada en 1641, que profundizaremos en este capítulo. Por otra parte, Descartes no se limitó por dar una explicación meramente física, sino que también profundizo en los cimientos de la geometría aportando un entendimiento más detallado en su publicación de la Geometría Analítica (1637), resultado de uno de sus tres apéndices del discurso del método, con propósito de buscar la verdad de la razón y explicar la realidad por medio de una lógica matemática (Hernández 2002).

La interpretación y el análisis de René Descartes en su obra meditaciones metafísicas conlleva a reflexionar sobre las cosas existentes (sustancias) que dan lugar a nuestras experiencias y sensaciones, nombrándolas sustancias extensas. Las cosas u objetos que llama sustancias extensas son aquellas que residen un espacio, ocupando una determinada longitud, anchura y profundidad dependientes de la figura, cuyas propiedades forman los límites de la extensión, proporcionando así mismo un mundo corpóreo, flexible y cambiante. Por consiguiente, todo objeto que esté bajo la experiencia tiene que ser extenso y procede únicamente de la naturaleza, indicando que todo ente corpóreo tiene propiedades que conforman la extensión.

Es importante mencionar que el concepto de espacio físico de Descartes tiene origen en la filosofía, fundamentalmente en la tradición metafísica, interpretando abiertamente identidades que relacionan el uso de una idea previa del espacio. La percepción a través del significado de la extensión corpórea busca directamente relacionar el comportamiento de las sustancias u objetos que tienen límite (extensión) con el espacio físico que los contiene, con el objetivo de traerlo al plano físico, material y sensible.

Ahora bien, la idea del espacio físico es formalizada a través de las sustancias corpóreas, asociando características y propiedades que estructuran una noción superficial, realizando aproximaciones mediante las relaciones variadas de un entorno dependiente. A través de las nociones básicas, Descartes en sus meditaciones metafísicas, a partir del proceso de la duda metódica, expone claramente el distinguir y determinar que solo puede estar seguro de aquellas cosas que se le presentan de modo claro y distinto, como lo recita en los principia (Peña 2017).

Claro llamo a aquello que está presente y manifiesto al espíritu atento; igual que decimos claras aquellas cosas que afectan con suficiente fuerza y potencial al ojo que las ve como presentes. Y llamo distintas a aquellas que, siendo clara, de tal modo separada y recortada de las otras, que no contienen en si nada más de lo que es claro (Descartes, 1644, p. 226).

De acuerdo con lo anterior, se establece dos tipos de entes esenciales para entender el aspecto del concepto de espacio físico. El primer aspecto es la intuición, sensación y percepción del ser, que denominaría “res cogitans”, y la segunda esta enmarcada de acuerdo con las sustancias “res extensas” que existen y hacemos uso para abstraer relaciones y comparaciones para detallar la naturaleza.

En primer aspecto es importante mencionar la propiedad de la “res cogitans”, y preguntarse ¿Cuál es la función que cumple la res cogitans con el concepto de espacio físico?, de esta manera la característica esencial de la “res cogitans” es dar mención a una identidad poseedora de un ser pensante, con propiedades racionales, que por medio de abstracciones interpreta las situaciones que se ven permeadas en la naturaleza. Cabe decir que la res cogitans está sujeta a la sustancia pensante, esencia necesaria del ser, cuya propiedad no puede ser afectada o accidentada por entes externos y que por dichas propiedades puede interpretar el espacio físico sintetizando relaciones que puede expresar mediante las sensaciones o percepciones físicas.

En este sentido, para Descartes la sustancia corpórea “res extensa” son los objetos que toman distintas formaciones o configuraciones en un espacio físico, ya que todo objeto inmerso en una espacialidad física sufre diferentes accidentes que resultan de una realidad fenomenológica dependiente del tiempo y de las diversas sustancias con las que pueda interactuar, lo que no suele ocurrir con la sustancia pensante (cogitans), cuya verdad fue la única de estar seguro y distinguir claramente, por lo tanto de una u otra forma dudaba⁴, pero dudar es un modo de pensar y él estaba seguro que pensaba.

⁴ Conclusión de la segunda meditación metafísica de Rene, Descartes. Meditaciones acerca de la filosofía primera, en las cuales se demuestra la existencia de Dios, así como la distinción entre el alma y el cuerpo del hombre, 1641. Web. Traducido Vidal, Peña.

Descartes a través del proceso metódico que había venido desarrollando de la distinción de las sustancias que podía intuir como claras y distintas ya había clasificado dos tipos de entes esenciales, la res cogitans y la res extensas, bases de vital importancia para el desarrollo del concepto espacial que mucho después asociaría de cierto modo con las nociones corpóreas y la geometría. De una u otra manera los objetos con límites de extensión son relacionados con una representación geométrica, haciendo del espacio físico una propiedad indispensable para el entendimiento y el desarrollo del lenguaje físico y espacial, en este caso la geometría era dependiente de una forma y una figura.

Dicho lo anterior, el concepto de espacio físico se resume en los límites de extensión que puede ocupar los objetos, explicando que a través de las propiedades claras como el volumen, el largo y el ancho, los cuerpos pueden estar situados en un lugar que también posee extensión para ser ocupado. Por medio de las relaciones entre las “res extensas”, Descartes supuso que el espacio tenía que tener propiedades de extensión continua para servir como recipiente de los objetos.

El ingenio de Rene Descartes lo conllevó a desarrollar una representación gráfica del espacio físico continuo a través de la ubicación de los objetos en un plano cartesiano, cuyos componentes eran entendibles como extensos. Pero esto no quiere decir que fue Descartes la primera persona en pensar y hacer uso de la representación cartesiana, Apolonio⁵ (262 a. C – 190 a. C) en su obra las cónicas, propone el uso de las coordenadas las cuales no fueron aplicadas por la carencia de las herramientas matemáticas y algebraicas que, si disponía los siglos XVI y XVII, pero aun así Apolonio fue capaz de formalizar una estructura geométrica que podía ser entendida por la geometría analítica.

Como ya antes lo había dicho, Descartes asocia la res extensa con los límites de los objetos, por medio de la relación que hace a través de la intuición de la longitud, anchura y profundidad. La introducción de la idea del plano cartesiano sobre los objetos corpóreos contribuye a dar lugar y significado a estas sustancias, reforzándolas con una estructura geométrica y describiendo

⁵Apolonio de una forma indirecta representaba las coordenadas mediante el uso de las abscisas y las ordenadas, aplicando líneas de referencia en los planos donde desarrollaba la geometría. Esta conclusión fue extraída de apuntes de historia de las matemáticas **La geometría analítica de Descartes y Fermat: ¿y Apolonio? Hernández (2002), véase el anexo A.**

relaciones con los diversos lugares que los objetos pueden ocupar. Pero aun así parece un problema complicado detallar el espacio como un ente extenso, por la razón que Descartes los considera solo como un concepto relacionado a la res extensa. Por ejemplo, no se puede concebir un objeto si un espacio, o un espacio sin objetos, es decir, supongamos un objeto en este caso una pelota de tenis, esta pelota está situada en el centro de la mesa cuyas dimensiones son de referencia estable, si mantenemos la pelota de tenis situada en reposo cuyo lenguaje extrínseco⁶ a la posición física nunca cambiará, como se puede observar en la figura 1.1. Pero si movemos la pelota de tenis a un punto diferente a la posición en la que se encontraba, notaremos un cambio en la designación geométrica y nos daremos cuenta del cambio que se produjo geoméricamente mas no en la cantidad extensa que compone la pelota.

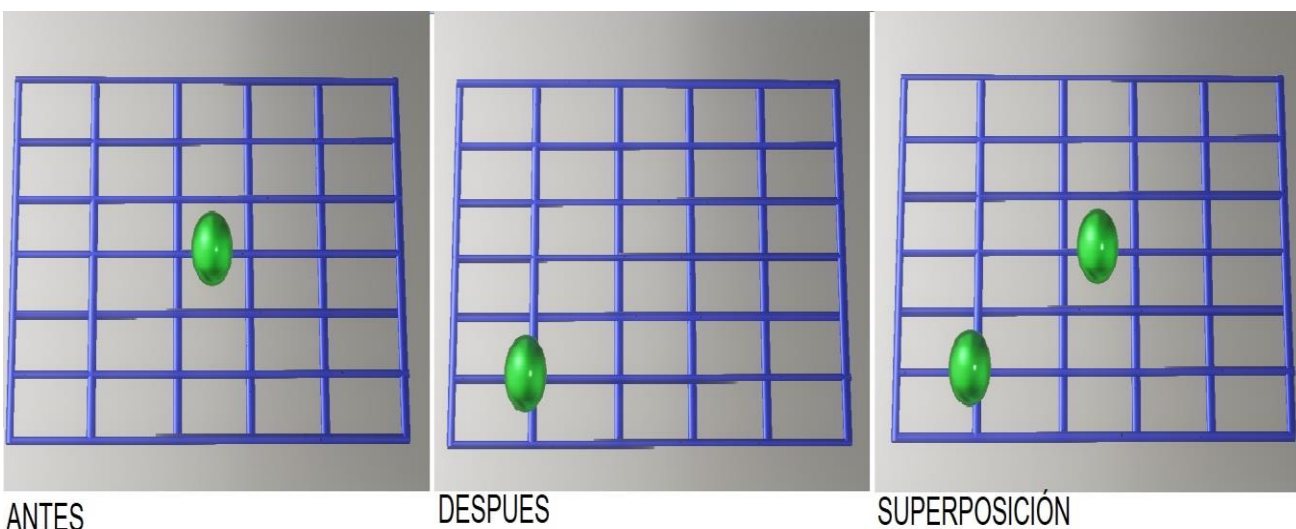


Figura 1.1: Representación gráfica de una sustancia extensa en el espacio

Ahora, si procedemos a colocar otra pelota de tenis en el centro de donde se encontraba la primera pelota sin cambiar la cantidad extensa como se observa en el después de la figura 1.1, es primordial decir que los distintos espacios⁷ pueden superponerse en el mismo intervalo de tiempo

⁶ La palabra extrínseca está relacionada con la introducción de las coordenadas. Es el lenguaje matemático que se utiliza para dar una explicación a un fenómeno físico. Por otra parte, la palabra intrínseca está relacionada con la forma y la figura, para este caso son propiedades que conforman la pelota de tenis como el volumen, área, radio, etc. Conclusión de fundamentos de las teorías del espacio-tiempo. Friedman, M, 1991, p.28.

⁷ La superposición del espacio puede darse directamente de los objetos extensos que residen el espacio, lo que no puede ocurrir con la superposición del mismo espacio por la razón de que no es percibido e intuido como un agente material.

conllevando a que las diferentes sustancias extensas ocupen diversos sitios o lugares del espacio contenedor. Descartes prosiguió con el análisis de las extensiones aclarando que el espacio no se podía reducir como un ente material puesto que él mismo no se puede superponer, pero como receptáculo de las extensiones es un medio para asociar que el espacio siempre tiene relación con los objetos.

El 29 de julio de 1648 Descartes escribió una carta para Antoine Arnauld⁸ declarando la inexistencia del vacío explicando y aclarando muy sintéticamente⁹:

La dificultad para reconocer la imposibilidad del vacío parece surgir principalmente de que no consideramos suficientemente que la nada no puede tener ninguna propiedad. Pues si nos diéramos cuenta de que en ese espacio llamamos vacío hay verdadera extensión, y por consiguiente todas las propiedades que se requieren para la naturaleza del cuerpo, no diríamos que aquel está completamente vacío, es decir, que es una pura nada. [...] Siempre puedo entender que hay extensión más allá de cualquier límite del mundo que pueda imaginarse; y tampoco puedo concebir un total tan vacío que no haya extensión alguna en su cavidad y que, por lo tanto, no haya cuerpo en él, porque donde hay extensión, necesariamente hay cuerpo. (Descartes, 1648, p. 211)

De acuerdo con el párrafo anterior, Descartes pensaba que realmente no podía existir un espacio físico en vacío absoluto, por la razón de que toda sustancia extensa ocupa una determinada magnitud, longitud, ancho, volumen, etc, pero si consideraba que podía estar en una ausencia o carencia de un ente extenso que no pudiéramos percibir o encontrar. Pero esto no significa que dicho espacio físico no estuviera ocupado. Por ejemplo, en la figura 1.1 si desaparecemos las pelotas de tenis queda solo el espacio, pero no queda en un total vacío, resulta que lo que observamos en total carencia de algún objeto queda ocupado con una sustancia extensa que es capaz

⁸ Antoine Arnauld (1612-1694) sacerdote, teólogo, filósofo y matemático francés, uno de los líderes jansenista y uno de los primeros en adoptar la filosofía de Descartes.

⁹ Esta parte del texto fue construido con el artículo **el concepto de espacio en descartes** una revisión sintética en vistas de desbanalizar el uso del concepto de espacio. Peña, Vicente. (2016). (p17)

de llenarlo, ya sea aire o un tipo de fluido que no es percibido, pero que existe y reside aquella extensión que tiene el espacio.

Descartes en los principia expone las relaciones entre cuerpo y espacio, exponiendo:

Verdad es que hay diferencia en nuestra forma de pensar la substancia corpórea y la del espacio, pues, retirada una piedra del espacio o lugar en la que estaba, entendemos que también se ha retirado del mismo la extensión de esta piedra, ya que la juzgamos inseparable; y sin embargo, pensamos que la misma extensión del lugar en la que estaba esta piedra ha permanecido, aunque el lugar que esta piedra ocupaba anteriormente haya sido llenado por madero o por agua, por aire o por cualquier otro cuerpo [...], ya que tomamos la extensión en general, y nos parece que la misma puede ser común a las piedras, a la madera, al agua y a todos los otros cuerpos [...], con tal de que sea de la misma dimensión, de la misma figura que anteriormente y que conserve una misma situación respecto de los otros cuerpos exteriores que determinan aquel espacio.(Descartes, 1648, p. 211).

Dicho lo anterior, Descartes estableció un espacio inmóvil y relativo de la posición de los cuerpos que definen los distintos lugares, mencionando que los objetos son móviles y cambiantes respecto a su forma y figura, involucrando directamente la extensión con la geometría como si fueran directamente proporcionales. Por otra parte, el espacio cartesiano posee propiedades matemáticas asignando valores numéricos a los distintos lugares que puede ocupar los objetos “res extensas”.

En conclusión, el concepto de espacio es totalmente relacional con los objetos “res extensa”, estableciendo tres tipos de espacio que pueden ser concebidos a través de los cuerpos, (1) el espacio físico tiene características por medio de la sensación y percepción clara. (2) El espacio geométrico se caracteriza por las diferentes extensiones que puede poseer los objetos situados en cualquier lugar del espacio, en este sentido, el contenedor de las “res extensas” tiene que poseer las mismas propiedades de sus ocupantes (relación), y por último (3) el espacio matemático se sintetiza como las diferentes posiciones o lugares que pueden obtener los objetos, obteniendo una asignación numérica en un plano cartesiano.

1.1.3. Leibniz y el concepto de espacio desde una perspectiva racionalista:

Esta sección está enmarcada por uno de los grandes pensadores de la edad clásica, un pensador de la misma talla como lo fue Aristóteles y Descartes en su época, cuya innovación se ve reflejada en las aplicaciones de diversas corrientes de estudio, genio que se le da el honor por haber inventado el cálculo integral. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) matemático, teólogo y filósofo racionalista enfocando en explicar que el conocimiento ideal está dado por la lógica y las matemáticas que sustenta el ideal de la pura racionalidad. Leibniz contemporáneo al gran físico Sr, Isaac Newton enfatizó sobre diversos temas y características de la naturaleza, en este caso expondré su noción sobre el concepto de espacio y sus rechazos a ciertas afirmaciones de Newton.

Desde tiempos muy antiguos se abarca la explicación de los fenómenos naturales desde diferentes puntos de vista, sintetizando el entendimiento de las acciones que nos rodean y que están presentes en la vida cotidiana. Pues como cada perspectiva ahonda diferentes características de analizar el objeto y el ser a conocer, se procede a seguir rigurosos parámetros para dar explicación detallada del ente a exponer.

Antes de abordar el concepto de espacio, explicaremos la postura filosófica que tiene Leibniz acerca de la naturaleza. El panorama filosófico de Leibniz se establece bajo el pensamiento racionalista, concibiendo dos clases de verdades, verdades de razón (*vérités de raison*) y verdades de hecho (*vérités fait*), enfatizando la racionalidad como condición necesaria del conocimiento.

Dicho lo anterior, las verdades de razón enfatizan la objetividad del conocimiento, y las verdades de hecho son aquellas verdades subjetivas, que de una u otra manera pueden ser real. Leibniz señala que las verdades de hecho tienen que ser construidas por una serie de transiciones continuas, de tal suerte que el esfuerzo del conocimiento ha de consistir en convertir cada vez mas amplios territorios de verdades de hecho en verdades de razón, como es el caso de la matemática, plenamente desarrollado por la lógica y el conocimiento. (Morente, 1980, p.154)

El concepto de espacio físico desde la percepción de Leibniz es totalmente relacional con los objetos y fenómenos que interactúan con él, en este sentido el depender y hacer parte de los fenómenos naturales rompe con el prototipo de espacio que estipula Isaac Newton, un espacio totalmente independiente, absoluto y homogéneo en cualquier punto, haciéndolo igual y equitativo en todas sus partes.

Dicho lo anterior, Leibniz concibe el orden de los fenómenos naturales como conexiones que están íntimamente ligadas unas a las otras (orden de relación), estableciendo una armonía entre lo simple y lo compuesto que surge del ámbito metafísico. En este sentido, la relación de diversas entidades puras y simples componen una ley de la naturaleza, proponiendo una continuidad sucesiva de factores que proponen la conexión y el vínculo del universo.

El espacio y el tiempo físico de acuerdo con las ideas de Leibniz son dos entes totalmente dependientes uno del otro, pero con funciones totalmente diferentes. Leibniz el 25 de febrero de 1716 en su tercera carta, le expone a Dr. Samuel Clarke¹⁰ que el tiempo es el orden de sucesiones, y el espacio es un contenedor de posibilidades entre el orden de las cosas que existen, estructurando una coexistencia entre estos dos entes, puesto que las declaraciones absolutistas de Newton le eran descabelladas e imposibles.

En cuanto a mí, he señalado más de una vez que consideraba el espacio como una cosa puramente relativa, al igual que el tiempo; como un orden de coexistencias, mientras que el tiempo en un orden de sucesiones. Pues el espacio señala en términos de posibilidad un orden de las cosas que existen al mismo tiempo, en tanto que existen conjuntamente, sin entrar en sus peculiares maneras de existir; y en cuanto vemos cosas juntas, nos damos cuenta de este orden de cosas entre ellas. (Leibniz, 1716, p.80)

El concepto de espacio físico de acuerdo con lo mencionado se propone de manera relacional con los objetos que residen en él, Leibniz considera el espacio como una entidad con propiedades relativas dependiente de la materia, escribiendo;

no digo que la materia y el espacio, sea la misma cosa; digo que solamente no hay espacio allí donde no hay materia, y que el espacio en si mismo no es una realidad absoluta. El espacio y la materia difieren como el tiempo y el movimiento. (Leibniz, 1716, p.62)

Dicho lo anterior, el espacio físico deja de ser absoluto e independiente de todo ente material, perteneciendo a un conjunto de relaciones y armonías entre las sustancias simples y compuestas que llamaría teoría de las mónadas. La teoría desarrollada por Leibniz consiste en dar

¹⁰ Resumen construido del artículo Themata revista de filosofía. Num,31. Blanco, Carlos Alberto (2005). Leibniz y la teoría de la relación. Pamplona: universidad de navarra de España.

explicación a las nociones oscuras y confusas que proponía Descartes, fenómenos naturales que se podían observar mediante la dinámica de los objetos. Leibniz estudia la tesis cartesiana deduciendo varias hipótesis sobre los cuerpos extensos, no obstante, buscó debajo de la pura espacialidad de los cuerpos extensos detallando que no solamente eran representaciones geométricas como lo afirma Descartes, sino que también son algo que contiene la figura geométrica, los puntos, la energía, lo dinámico, representaciones indivisibles e individuales que no poseen extensión alguna.

La concepción de mónada constituye una parte infinitesimal del microcosmos, obteniendo una síntesis global de la universalidad. Leibniz a través del cálculo infinitesimal pensaba que el orden del espacio estaba reunido por pequeñas manifestaciones vinculadas, formando lo sustancial entre lo compuesto y la materia, pero dichos entes estaban conectados por una esencia determinante. En resumen, el espacio físico y el tiempo estaba caracterizado por las distintas relaciones que obtenía con las mónadas, pero dicha conexión estaba conformada por los puntos infinitesimos, límites y entidades que construyen el mínimo corpúsculo subdividido hasta el infinito.

Leibniz después de haber terminado la teoría de las mónadas no estuvo de acuerdo con la teoría de la gravitación universal de Newton, proponiendo que la acción a distancia instantánea carecía de la conexión de los diferentes puntos infinitesimos que conformaba el espacio, tiempo y materia, afirmando que las distintas relaciones era una sucesión de órdenes establecidos por los objetos relativos de su posición y de su tiempo. Por consiguiente, la concepción de una acción a distancia instantánea no consideraba la sucesión de intervalos unidos por las mónadas rechazando el lugar de las cosas, el cual Newton responde a lo argumentado, “el espacio no depende de una tal o cual situación de los cuerpos”, A lo que responde Leibniz;

No depende de una tal o cual situación de los cuerpos, pero es este orden lo que hace que los cuerpos sean situables, y por el cual ellos traen una situación entre si al existir conjuntamente, igual que el tiempo es este orden respecto a su posición sucesiva. Pero sino hubiera criaturas, el espacio no existiría mas que en las ideas de Dios¹¹. (Leibniz, 1716, p.5)

¹¹ Segundo carteo de Leibniz y Clarke del 2 de junio del año 1716.

En conclusión, el espacio y tiempo físico son dependientes, y se compone de las diferentes relaciones de la percepción e intuición con respecto a la posición relativa de los cuerpos, es decir el universo carecería si fuera un ente individual. El concepto de espacio matemático tiene origen en las sucesiones infinitésimas de la conexión entre los diferentes entes que componen la acción, pues las mónadas no son materia, sino entidades infinitesimales, entidades lógicas que sin embargo son susceptibles, como lo menciona Blanco (2005).

Por otra parte, el concepto de espacio geométrico esta puramente relacionado con la forma y figura de los objetos extensos, vinculados con la esencia de la materia, reconociendo sus propiedades divisibles a través de lo compuesto, dichas características están contenidas en la estructura superficial de los límites de la extensión.

1.1.4 El espacio absoluto de Isaac Newton.

La física clásica está constituida por una gran mayoría de ideas y de aportes que hizo el físico y matemático inglés Sr. Isaac Newton (1643-1727), sintetizando varios fenómenos naturales con el conocimiento de la geometría y las matemáticas, abordando diversos temas y problemáticas que aun estudia la física y la ciencia en general. Newton quien describió la ley de la gravitación universal explicó y detallo sus concepciones acerca del espacio desde un ámbito físico y metafísico, resaltando aspectos importantes y emblemáticos para su teoría.

La concepción del espacio y tiempo está muy arraigada en su obra cumbre “los principios matemáticos de la filosofía natural”, donde explicita en su escolio principal sus nociones acerca del concepto de espacio y tiempo, diciendo:

El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en si por su propia naturaleza y sin relación a algo externo, fluye uniformemente, y por otro nombre se llama duración; el relativo, aparente y vulgar es una medida sensible externa de cualquier duración, mediante el movimiento (sea precisa o no uniforme) y de la que el vulgo usa en la vida cotidiana cuando se refiere a horas, minutos, días y años. (Newton, 1687, p.23)

El espacio absoluto, por su naturaleza y sin relación a cualquier cosa externa siempre permanece igual e inmóvil. El espacio relativo es cualquier cantidad o dimensión variable de este espacio, que nuestros sentidos determinan por su posición en relación con los

cuerpos, espacio que el vulgo; toma por el espacio inmóvil; tal es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo o celeste, determinado por su posición con respecto a la tierra. (Newton, 1687, p.6)

En esta parte del escolio Newton propone un espacio absoluto, recipiente y contenedor de todos los objetos materiales, independiente de todo objeto que se encuentre en el espacio. Pues si muy bien distingue Newton, el espacio es homogéneo en todas sus direcciones y equivalente en todos sus puntos, conllevando a pensar que el espacio es infinito careciendo de puntos de frontera. Ahora bien, cabe resaltar, ¿Por qué considera el espacio en su totalidad como independiente y absoluto?, en este orden de ideas Newton estructuró el espacio, la materia y el tiempo como tres clases de sustancias existentes de una realidad, sumando el espíritu desde un ámbito metafísico, especificando; el espacio no depende de la situación o ubicación alguna de la materia como lo menciona Blanco (2005), conllevando a explicar que el espacio relacionado con un ente externo permanece inmóvil y similar, cuya estructura no se ve afectada por ningún ente externo ni interno, concibiendo un espacio total y homogéneo desde cualquier punto de vista observable.

El concepto absoluto del espacio y tiempo tuvo un gran impacto desde la teoría metafísica de Newton, estipulando varias características que no son interpretadas y concebidas por parte de la teoría de la mecánica de los cuerpos (dinámica), puesto que el concepto de espacio es altamente teórico donde no conforma parte alguna de una ley de la teoría, pero de una u otra forma establece un sentido para especificar dicha teoría. Desde la perspectiva de la metafísica, Newton establece el espacio inmóvil como una entidad o sustancia independiente de todo objeto material, cuya estructura no puede ser afectada por ningún objeto material externo o interno sin importar en donde se encuentre, por consiguiente las hipótesis y tesis ontológicas relacionan el principio enmarcado por el ser como una propiedad de la metafísica-teología, en donde se resalta: “Dios es el único que puede actuar sobre los objetos materiales” como lo menciona (Bravo, 2012), dicho esto, la teoría del espacio metafísico contribuye como método de explicación. Por otra parte, desde un enfoque científico el concepto absoluto del espacio está inmerso en una estructura abstracta, matemática y geométrica detallando axiomas y leyes representativas que van de acuerdo con el concepto del espacio, en este caso las propiedades geométricas designan lo infinito o finito, lo continuo o no, lo euclídeo o no-euclídeo, características que posee y da lugar a la explicación de los fenómenos físicos permeados de una realidad científica.

El enfoque de Newton por estructurar el espacio conllevó a seguir ciertos axiomas de una geometría específica que logro establecer la teoría mecánica de los cuerpos, analizándolo desde un punto de vista abstracto y conceptual. Dicho lo anterior, el espacio esta rígido por definiciones que cumplen los diferentes axiomas de las distintas geometrías, en este caso la geometría euclídea se adapta por explicar el concepto de espacio newtoniano. Por ejemplo, cuando se dice que el espacio es euclídeo se detalla tres 3 dimensiones que podemos concebir, de arriba hacia abajo de adelante hacia atrás y de izquierda a derecha, cumpliendo los postulados y las nociones de un espacio que se considera plano, homogéneo e infinito.

Como ya lo hemos venido mencionando, la teoría del concepto de espacio newtoniano acata los postulados que se encuentran en la geometría euclidiana, explicando de una manera más geométrica y general la mecánica clásica. El primer postulado de la geometría euclidiana hace referencia a la continuidad del espacio, el cual expresa que es posible trazar una línea recta por dos puntos distintos y separados, y el segundo postulado está inmerso por detallar la infinitud sobre las líneas rectas que pueden extenderse indefinidamente, conllevando a estructurar dicho espacio de forma continua, homogénea e infinita (Sepúlveda, 2003)

Es evidente que para la teoría de la física clásica Newtoniana el espacio y el tiempo son dos entes que no dependen uno del otro, por el contrario, son dos aspectos que se comportan totalmente independientes. Tal es el caso que Newton expone un tiempo absoluto independiente de todo ente externo que fluye uniformemente sin referencia a nada, “todos los movimientos pueden ser acelerados o retardados, pero el flujo del tiempo absoluto no puede ser alterado”. (Newton,1687, p.34), considerando que toda medición y clasificación son características de nuestro sentido por lograr detallar diversos eventos a los que estamos inmersos a organizar, considerando estas mediciones como tiempo relativo.

Desde el anterior análisis nos damos cuenta de que el espacio en su totalidad posee propiedades importantes para distinguir, como de ser independiente, inmóvil y estático, ¿pero cómo Newton alcanza a concebir dicho espacio en su totalidad como un recipiente inmóvil?, Newton en su libro los principia en la parte de su escolio principal, coloca como ejemplo; los objetos poseen velocidades absolutas y relativas, todas ellas observadas y medidas mediante nuestras intuiciones que son orientadas desde un espacio (lugar) absoluto o relativo inmóvil. El anterior ejemplo, está

inmerso en concebir y distinguir el espacio absoluto del espacio relativo, teniendo en cuenta el reconocimiento de dichos conceptos que están sumergidos en la explicación y en la orientación (puntos de referencia) de los fenómenos naturales, en este caso a detallar la velocidad de un objeto.

Ahora bien, siguiendo esta idea que nos propone Newton cabe formalizar un ejemplo descriptivo y gráfico, supongamos que se encuentran dos planetas en un plano cartesiano, plano que representará el espacio en su totalidad, y los planetas que están ubicados tienen una velocidad igual que la que tiene el espacio, dicho sistema no es afectado por ninguna fuerza interna ni externa, designando el movimiento como rectilíneo uniforme.

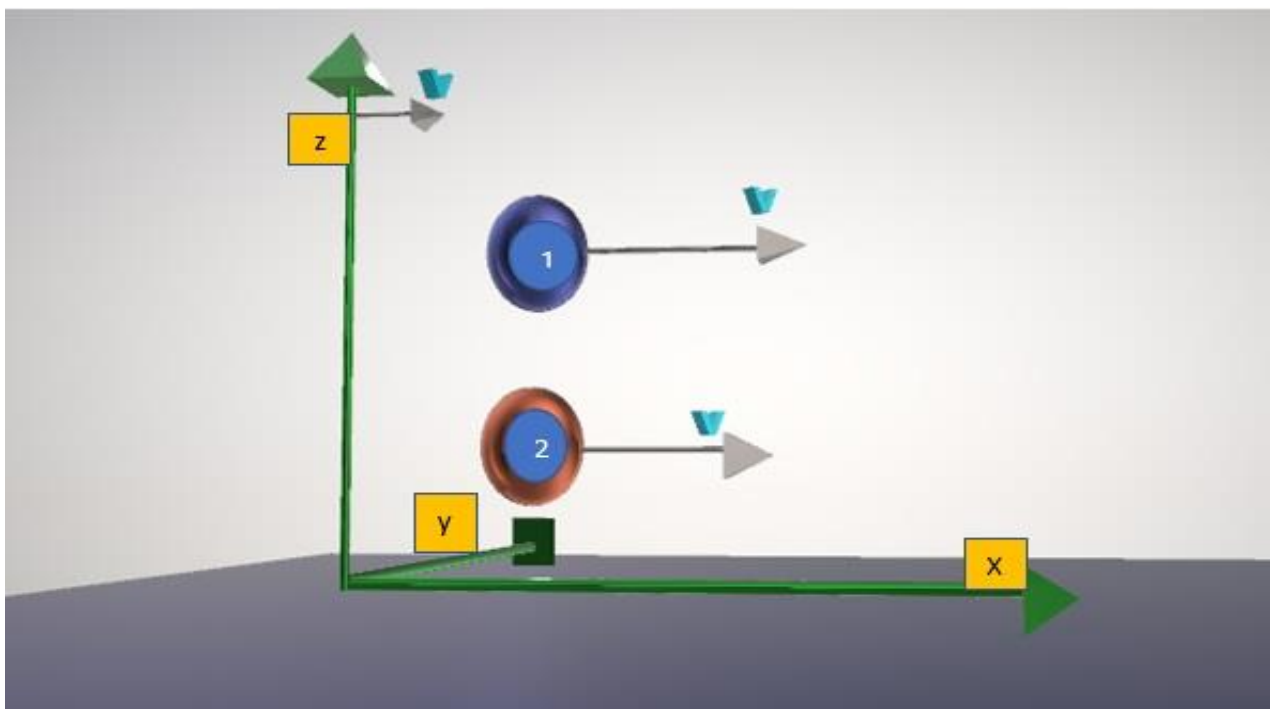


Figura 1.2: Representación gráfica del espacio y dos planetas con la misma velocidad

Como se puede observar en la figura 1.2, los dos planetas se encuentran en un plano cartesiano de tres dimensiones que se mueven con la misma velocidad, igualmente el espacio que los contiene. No obstante, cabe aclarar que las velocidades son totalmente independientes, partiendo del hecho que los objetos materiales no alteran la estructura del espacio que es plano, homogéneo e infinito¹². Ahora procedemos en posicionarnos en el planeta 1, y comenzaremos a observar el planeta 2, todo esto conllevado en hacer un análisis que está relacionado con las

¹² Cuando el espacio toma el concepto de homogéneo quiere decir que no está limitado.

afirmaciones e hipótesis acerca de las ideas que Newton nos propone en su libro los principia, donde nos expone que estamos en un espacio inmóvil (estático).

En este orden de situaciones e hipótesis podríamos afirmar que el planeta en donde nos ubicamos (planeta 1) no alcanza a percibir o detallar ningún movimiento del planeta 2, debido a que todo el sistema está en movimiento constante, procediendo a caer en la ilusión de observar el espacio y el planeta en aparente reposo sin cambio alguno, afirmando que estamos en un reposo absoluto. Ahora bien, si pensamos un espacio homogéneo en todos sus sentidos, es decir que es infinito en todas sus direcciones se hace más complicado en detallar si el espacio está en movimiento o esta inmóvil.

De acuerdo con lo anterior, procedemos a detallar que el sistema de referencia es importante, describiendo las características de cualquier punto de vista de donde lo observemos. En este sentido, como todo esta en movimiento uniformemente constante daremos cuenta que todo esta en reposo absoluto, sin detallar el mínimo cambio que suceda al posicionarnos en otro lugar, puesto que pertenecemos al movimiento del planeta y del espacio.

A continuación, procederemos a explicar la relación que tiene la mecánica newtoniana y su teoría intrínseca basada en los sistemas inerciales, para dar cuenta sobre los lugares absolutos y relativos. Newton como ha de esperarse comenzó a introducir una herramienta muy importante para explicar el reposo y los movimientos de los cuerpos a través de los sistemas de referencia, proponiendo que todo objeto en relación con el espacio absoluto inmóvil podía estar participando de un reposo absoluto o relativo, como también pueden participar de un movimiento absoluto o relativo. Como bien lo especifica en la parte principal de su escolio de los principia; en el caso de un barco que está en movimiento hay un cuerpo dentro del barco que está en reposo, si el barco este movimiento con respecto al espacio inmóvil, el barco poseerá una velocidad absoluta, y en el caso del cuerpo que está participando del movimiento del barco, como la pelota de tenis, este cuerpo estará en un reposo relativo respecto al espacio inmóvil, como se ilustra en la figura 1.3.

En la figura 1.3 se observa que, en la parte de arriba del barco hay un vector designando la velocidad, y la pelota de tenis no tiene ningún vector porque está en aparente reposo respecto al barco. Es importante detallar que la pelota de tenis respecto al barco está en un total reposo, debido a que no se evidencia ningún cambio de posición. Pero para un observador que se encuentra por

fuera del barco analizara que tanto como la pelota y el barco están en movimiento, evidenciando un cambio de posición en el transcurso del tiempo.

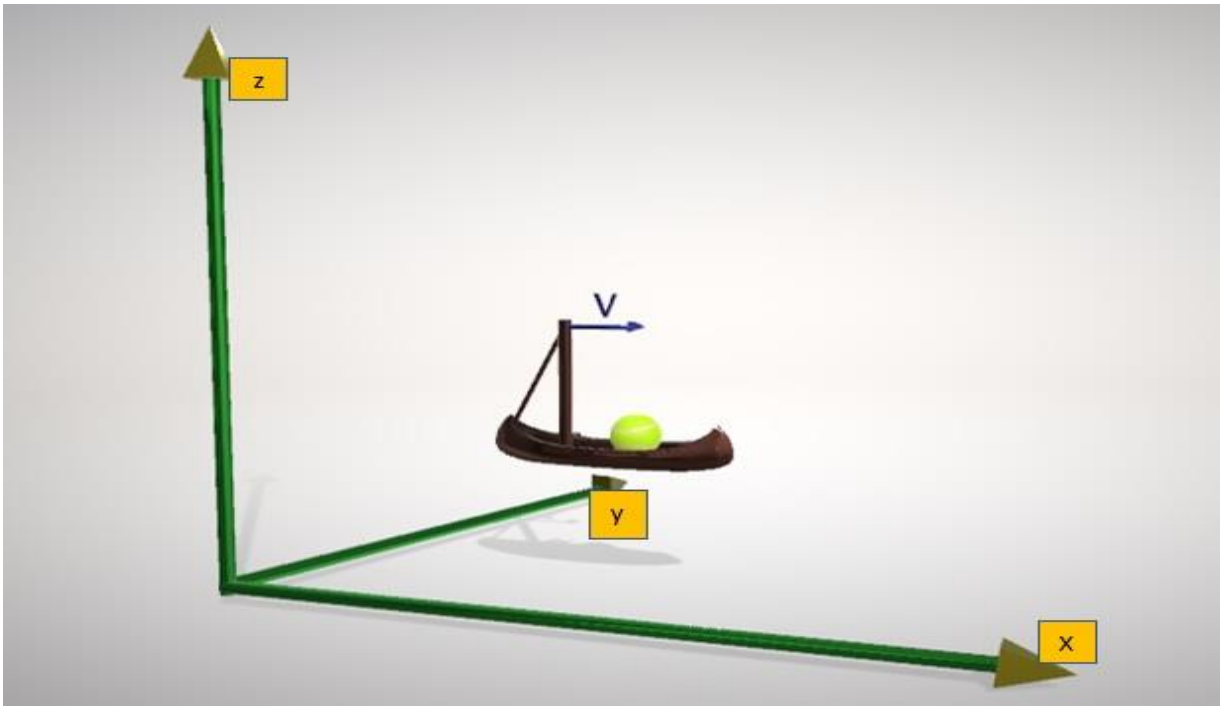


Figura 1.3: Representación gráfica del movimiento absoluto y reposo relativo, respecto al espacio inmóvil.

En el ejemplo de la figura 1.3 habla implícitamente sobre las nociones de los marcos inerciales, haciendo referencia al reposo o movimiento de los objetos desde donde son observados. La primera ley de Newton detalla el principio de la inercia, haciendo énfasis en que todo objeto no puede modificar su estado de reposo o movimiento sino se aplica alguna fuerza sobre él. Ahora bien, los sistemas inerciales son como tal el marco de referencia de donde el observador procede a medir distintas magnitudes que contribuyen a especificar la posición, velocidad de los objetos de dicho espacio, conllevando a denominar los sistemas inerciales como los lugares relativos.

Por último, Newton detalló el espacio como un sistema inercial en reposo absoluto, designando que todo objeto que este ubicado en otro objeto en movimiento, participa también del movimiento de su lugar, y cada movimiento íntegro está compuesto por los movimientos de los primeros lugares, así sucesivamente hasta llegar a un lugar absoluto inmóvil que dé cuenta del movimiento absoluto. (Newton, 1687, p.7)

De acuerdo con lo anterior, Newton desarrolló un experimento (balde de Newton) en donde verificó el “reposo absoluto del espacio”, cuyas características le servirían de apoyo para explicar el movimiento de los objetos absolutos y relativos. Newton describió que, al colocar a rotar un balde lleno de agua suspendido al techo, el balde giraba, pero el agua que estaba dentro de él no giraba hasta detenerse el balde. Luego de haberse detenido, el agua que estaba contenida comenzaba a girar, tomando la velocidad con la que el balde estaba. Después de haber obtenido el balde y el agua en reposo, describió; cuándo el balde esta en movimiento, el agua esta en reposo para dar constancia del movimiento de él mismo, igualmente pasa en sentido contrario, cuando el balde está en reposo, el agua comienza a moverse, detallando el balde del movimiento del agua.

En conclusión, el concepto de espacio físico establece; un espacio independiente, homogéneo e isotrópico en todos sus puntos, relacionando la equivalencia para cualquier lugar, sin ser afectado por cualquier fenómeno natural u objeto que se encuentre en él. Por otra parte, el concepto de espacio geométrico obedece los postulados de Euclides, admitiendo un espacio tridimensional, infinito y plano.

1.1.5 Kant y su postura frente a las ideas de Newton.

Para terminar con este primer capítulo, no se nos puede escapar el filósofo prusiano que también indagó e investigó sobre el concepto de espacio a partir de las ideas de Newton, quien investigo varias hipótesis de diversas corrientes filosóficas que se habían venido formando en esta edad clásica, contribuyendo a terminar un periodo filosófico importante (idealismo) que empezó Rene Descartes.

Los trabajos del filósofo Immanuel Kant (1724-1804) retoman muchos aspectos mencionados anterior mente, estableciendo una síntesis general de lo que se ha venido tratando sobre el concepto de espacio. En su publicación más celebre *critica de la razón pura* publicada en el año 1781 y corregida en una segunda edición divulgada en el año 1787, expone sus cimientos acerca de lo que se debe considerar como ciencia, analizando el objeto de las matemáticas, física y demás ciencias en el conocimiento de la objetividad de la naturaleza. Kant propone varias tesis para confirmar que el objeto de la ciencia es enriquecer el conocimiento que está inmerso en el ente físico, proponiendo varios conceptos relacionados con el ser, inmersos en la experiencia y en las ideas innatas que poseemos.

La ciencia se basa a través de la experiencia y de las intuiciones que concebimos puras, en este sentido Kant llama a las intuiciones puras como a priori, basándose en las cosas que intuimos sin necesidad de la experiencia, y los objetos que entendemos o concebimos a través de la experiencia las denomina a posteriori. En este sentido la organización de estos dos conceptos serán la base para dar a entender lo que nos quiere exponer acerca del concepto de espacio, partiendo de ciertos significados que van a tomar gran importancia para la filosofía premoderna y posmoderna. Como ya lo he mencionado en la parte de la filosofía del racionalismo, Leibniz considera las matemáticas y la física como fundamento de las verdades de razón, concibiendo que son la base de la objetividad del conocimiento. Pues si es bien, la filosofía racionalista distingue el conocimiento humano en dos clases de verdades, la primera es la verdad de razón (*vérités de raison*), que son aquellas que analizan o enuncian el conocimiento objetivo, y la segunda son las verdades de hecho (*vérités fait*) estableciendo que son verdades subjetivas, que de una u otra manera pueden ser verdad.

Kant en su obra *critica de la razón pura*, recoge todos estos conocimientos de la filosofía del idealismo, racionalista y empirista, para empezar, adoptar una nueva base que sustenta las dos verdades racionales desde una perspectiva más idealista, nombrando las verdades de razón y verdades de hecho como juicios analíticos y juicios sintéticos. Los juicios para la corriente filosófica kantiana esta argumentada bajo la postura de las tesis que afirman o proponen enunciados objetivos de carácter lógico, afirmando verdades o errores asignados a los objetos.

Como ha de esperarse, los juicios comienzan a contemplarse bajo la postura de una teoría del conocimiento, dando explicación a lo objetivo y subjetivo. Los juicios analíticos son verdades que componen el sujeto, explicando detalladamente su predicado hasta volver a retomar en si la explicación del sujeto, denominando esta secuencia como tautología. Por ejemplo; un cuadrado tiene cuatro ángulos iguales, cuatro lados de igual magnitud, tiene dos a dos lados paralelos en donde las dos diagonales son perpendiculares y se cortan en un punto medio, lo que nos conlleva a decir que estas características conforman como tal la figura de un cuadrado. Ahora bien, este ejemplo formula un juicio sobre una imagen que podemos representar mentalmente del concepto del cuadrado, y si lo analizamos encontramos que el concepto del sujeto (predicado) está el de tener cuatro lados, dos a dos lados paralelos y etc. Conllevando a mencionar todas sus características.

Cuando terminamos de especificar el predicado volvemos hablar del sujeto (cuadrado), dando cuenta que el sujeto se encuentra contenido en el seno del predicado.

Los juicios analíticos en cierta medida son¹³ tautológicos, es decir lo mismo, el predicado menciona al sujeto y el sujeto al predicado en forma repetitiva. Kant afirma que las proposiciones de esta índole son más que oriundas de la experiencia, consideradas a priori, donde los conocimientos no necesitan de la experiencia para describirlos. Esta parte es muy importante, porque Kant expone que los juicios analíticos no ayudan a incrementar el conocimiento sobre las cosas, por la sencilla razón de que volvemos a decir lo mismo que hay en el enunciado (sujeto-predicado), convirtiendo a los juicios analíticos en verdades universales independiente de todo tiempo y lugar.

El mundo cotidiano no solamente procede de las nociones a priori e intuiciones que podamos obtener, sino que también adquiere sentido a través de las experiencias y del sentido lógico que podemos ir construyendo. Los juicios sintéticos están contruidos en base de todas las percepciones y experiencias que podamos obtener, en este caso los juicios sintéticos son verdaderos en cuanto la experiencia los pueda afirmar, contribuyendo a una validez limitada a la experiencia sensible, teniendo lugar al aquí y el ahora.

Los aspectos más particulares de los juicios sintéticos (a posteriori), es el papel que involucra el concepto del sujeto y el predicado. Pues si es bien, los juicios analíticos son tautológicos a priori, en donde el sujeto y predicado están ligados por una densa conexión. En este caso, el rol que toma el sujeto y el predicado de los juicios sintéticos son heterogéneos, pues el concepto del predicado no esté contenido en el concepto del sujeto, consistiendo en unir elementos de distinta clase o naturaleza.

Un ejemplo más detallado de un juicio sintético es analizar un fenómeno físico cotidiano. Supongamos que tenemos un sólido que está en transición de fase (fusión) ha estado líquido, en donde comenzaremos a detallar que dicha fusión se debe a la variación de energía y de calor del sistema, dilatando o expandiendo las diminutas partículas que componen el sólido. Si nos damos

¹³La palabra tautología es originada del lenguaje griego, conformada por dos palabras, “tauto” significa decir y “logia” significa mismo. La palabra tautología significa decir los mismo. Conclusión del libro lecciones preliminares de la filosofía. Morente, Manuel.

cuenta al detallar la transición de fase, mencionamos el concepto de calor y energía, teniendo en cuenta que dichos conceptos no están directamente relacionados con la explicación de la transición de fase. Pues en este sentido el concepto de calor y energía abarcar diversas explicaciones que no se ven meramente inmersas en la explicación de la transición de fase de los materiales, sino que comprende diversos fenómenos naturales, estableciendo que el predicado no es directamente proporcional al concepto del sujeto.

En este sentido como lo hemos mencionado, Kant argumenta que la ciencia no puede ser un objeto tautológico, ni un objeto heterogéneo como lo ha venido exponiendo en sus juicios, sino que tiene que estar compuesto por la relación entre estos dos juicios inmersos en las intuiciones innatas y sensaciones que dan lugar la experiencia, proponiendo que la ciencia tiene que ser sintética a priori. Dicho lo anterior cabe preguntarse ¿Qué es sintético a priori?, Kant establece una ciencia universal y necesaria, en donde una buena experiencia es lo suficientemente impactante para fundamentar una ley que necesita de un objetivo y un hecho en particular contingente. En este lugar cabe suponer que la experiencia tiene que ser válida para todas las experiencias sin importar el tiempo pasado, presente y futuro.

Las ideas que toma Kant acerca de las nociones del espacio newtoniano son realmente impactantes en términos de la ley fundamental de la ciencia sintética a priori. Como ya lo hemos venido argumentando no solamente se necesita de las ideas puras ni de las buenas experiencias, sino que necesitan de las dos situaciones para estructurar las leyes de la naturaleza, pues para Kant las leyes fundamentales de Newton era lo suficientemente necesarias para estructurar las ideas innatas a través de las matemáticas y las experiencias que se obtenían a partir de las nociones físicas, especificando estos dos entes como esqueleto principal de las leyes fundamentales.

El concepto de espacio para Kant es muy amplio debido a la división detallada que hace a través de la metafísica, la matemática y la física. Pues desde la perspectiva metafísica, Kant expone la relación de las cosas que no percibimos y no intuimos bajo ninguna experiencia sensible o percepción, suponiendo el espacio de manera a priori, es decir absolutamente independiente de la experiencia. El concepto de espacio para la teoría metafísica deja de ser un concepto reunido bajo la variedad de las cosas, pues Kant deja muy claro que los conceptos son el orden de los números o conjuntos indefinidos que se comprenden a partir de los objetos, detallando que el espacio no

cubre ningún elemento o variedad de objetos, sino que el espacio es la intuición de un sistema único, interpretado mediante coordenadas de tres dimensiones.

Kant desde el enfoque matemático y físico sigue proyectando la noción de espacio como una intuición pura (a priori), construyendo las intuiciones de forma objetiva a través de la ciencia sintética a priori. Por consiguiente, el espacio matemático y físico solo hace parte de las intuiciones puras que poseemos, nombrando esta tesis como exposición trascendental¹⁴. Dicho lo anterior, la exposición trascendental consiste en colocar un objeto en conocimiento desde un enfoque relacionado con la objetividad, cuyo conocimiento es independiente de la experiencia de los sujetos que procedemos a colocar por necesidad de la explicación de la base que los sustenta.

El párrafo anterior menciona varios aspectos importantes relacionados con la noción panorámica que tenemos acerca del espacio, inmerso en las percepciones y sensaciones. Los geómetras cuando establecen una teoría matemática y geométrica suponen un espacio como base que procede antes de toda imaginación que podamos dar de los objetos, obligándonos acudir al llamado de la intuición pura de la espacialidad, formalizando dichos axiomas y representaciones que podamos dar lugar a los objetos que residen dicho espacio.

El espacio Newton-Kant en aspectos físicos se comporta de forma euclídea, siguiendo los postulados más importantes que resalta Newton para estructurar su teoría de la mecánica de los cuerpos. De esta manera, el espacio kantiano posee las propiedades de tener tres dimensiones (3D), como lo especifica Euclides en su primer y segundo postulado, cuyo énfasis se presencia en la continuidad e infinitud del espacio, el cual es poseedor de ser homogéneo e infinito, que dichas intuiciones proceden a detallar el arriba y el abajo, la derecha e izquierda, y de adelante hacia atrás.

Por otra parte, Kant expone la independencia del espacio con respecto a cualquier agente que se encuentre en él, haciendo referencia en que ningún objeto material puede afectar la estructura del espacio, concibiéndolo como un plano llano. Dicho lo anterior, la interacción del espacio y materia son totalmente independientes, pues los objetos (materia) se representan de forma equivalente en todos sus puntos, sin alterar ninguna propiedad del espacio. Pues el espacio no es un conjunto de cosas o variedades reunidas, sino es único y universal. No obstante, el espacio no

¹⁴ La palabra trascendental significa que es independiente de la experiencia, noción objetiva de las intuiciones.

procede de la experiencia, sino es una concepción innata que tenemos para poder detallar los objetos que se encuentran en dicho recipiente o contenedor.

Capítulo II

El concepto de espacio moderno, Teoría especial de la relatividad.

Introducción

Bajo la construcción teórica y argumentativa del primer capítulo, se enfocará este segundo capítulo en analizar las diferentes perspectivas que dio auge a la teoría de la relatividad especial y su concepto asombroso del espacio.

El contexto moderno emerge a través de las múltiples innovaciones teóricas y experimentales que alcanzan a demostrar varias concepciones que no se habían tomado en cuenta, sesgando la posibilidad de considerar la explicación de una nueva teoría a través de geometrías no euclidianas que pudieran detallar más allá de nuestra percepción y orientación de la naturaleza del concepto de espacio.

2.1 Ernst Mach y su concepción de espacio, una relación intrínseca con la materia.

Ernst Mach filósofo empirista, físico y matemático de origen austriaco contribuyó a formalizar la teoría del concepto de espacio moderno, rechazando todo carácter absolutista que exponía Isaac Newton. Pues para Mach el concepto de espacio se ve permeado por la racionalidad, criticando todo carácter abstracto de las hipótesis que hay en los experimentos newtonianos.

Mach indaga sobre el concepto de espacio absoluto de Newton, afirmando que el espacio se puede interpretar mediante sensaciones y experiencias físicas, hecho que contradice cierta parte teórica de Newton, retomando y haciendo énfasis sobre el concepto de los marcos inerciales. Mach de esta manera analizó y describió los experimentos que Newton realizó, enfocando la interpretación del experimento del balde (cubo de Newton), experimento que conllevó a la teoría de la mecánica a entender y estructurar dicho espacio que resulta ser inmóvil y absoluto.

El experimento consiste en tener un balde lleno de agua, que está suspendido por una cuerda al techo, como se ilustra en la figura 2.1. Dicho experimento procede a retorcer la cuerda (secuencia 1) que sostiene el balde con agua, hasta llegar al punto en donde se procede a soltar la cuerda. En el momento cuando se suelta la cuerda el balde va a comenzar a girar (secuencia 2), mientras tanto el agua que está dentro del balde va a permanecer en reposo. Ahora bien, cuando el balde deja de girar hasta llegar al reposo, el agua va a comenzar a girar por el movimiento que llevaba el balde (secuencia 3), hasta llegar a su punto de reposo.

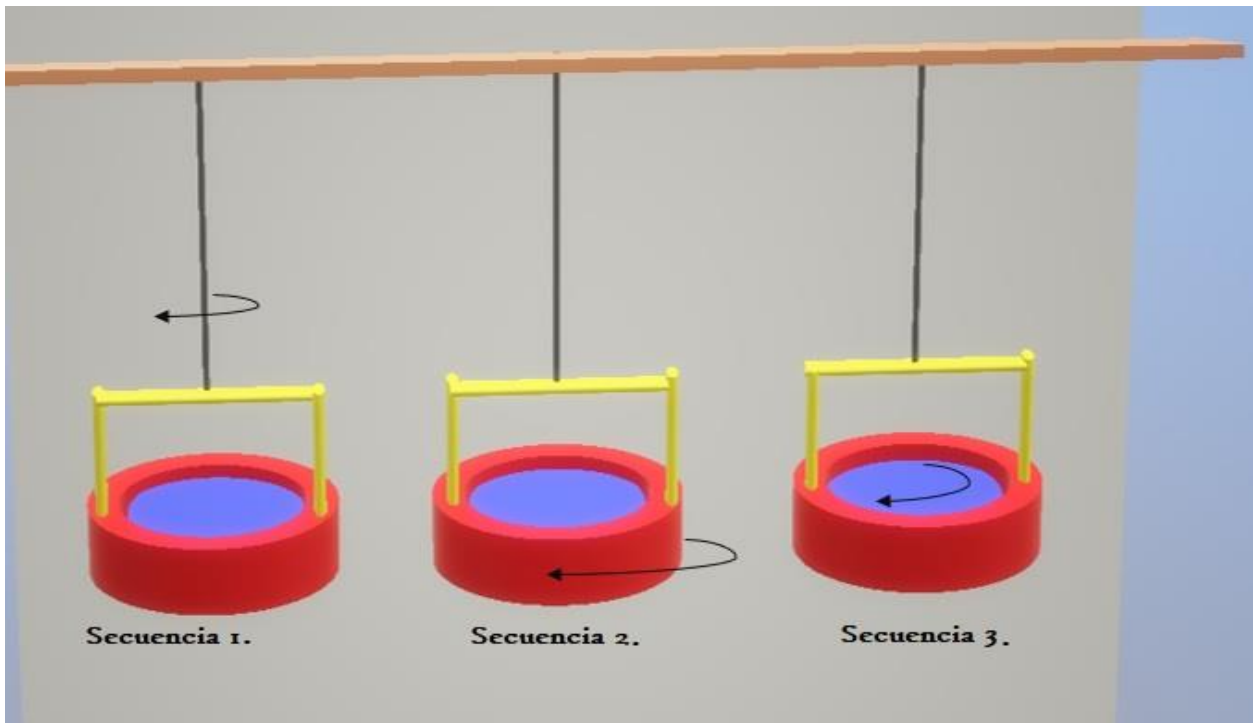


Figura 2.1: Representación gráfica del experimento de Newton, crítica de Ernst Mach.

Desde la perspectiva Newtoniana, el movimiento del balde con respecto al agua que está en reposo, y el movimiento del agua cuando el balde está en reposo refleja el comportamiento del espacio (inmóvil) con los objetos. Newton afirma que para detallar el movimiento de un cuerpo con referencia a otro se necesita de un marco inercial inmóvil. En este sentido, cuando el balde está en movimiento, el agua está en reposo para dar cuenta del movimiento del balde, igualmente ocurre esto en sentido contrario. Por consiguiente, la deducción más completa de Newton fue especificar que el conjunto de los movimientos íntegros hace parte de un marco inercial estático e inmóvil, para dar relación a los fenómenos que adquieren movimiento en dicho espacio contenedor.

De acuerdo con el experimento, Mach hace una reflexión y explica que Newton está dejando a un lado varios aspectos importantes que deben ser considerados más allá de lo abstracto y el influjo de las suposiciones. En la publicación *The Science of Mechanics*, aparece Mach y una propuesta epistémica acerca del concepto espacio y tiempo, haciendo énfasis en la desviación que tiene Newton al querer explicar estas nociones bajo un parámetro científico, cayendo de una u otra manera en el influjo de la explicación de la metafísica, construyendo explicaciones de ideas que solamente proceden de pensamientos y construcciones mentales que no pueden ser contrastados mediante la experiencia.

De acuerdo con lo anterior, Mach da inicio a la solución del problema indicando que Newton no analiza el experimento a fondo, fortaleciendo los argumentos que tenía Leibniz frente al carteo con Clarke. Escribiendo Mach:

En el experimento de Newton con el cubo de agua en rotación únicamente nos dice que la rotación relativa del agua con respecto a las paredes del recipiente no produce ninguna fuerza centrífuga perceptible, pero que tales fuerzas si se producen como consecuencia de la rotación relativa respecto a la masa de la tierra y demás cuerpos celestes. (Mach, 1883, p.31)

Por consiguiente, Mach indica que la inercia es un concepto meramente relacional, considerando que dicho espacio y tiempo hacen parte de un grupo que completa la relación de los cuerpos. Si es bien, Mach está en contra de la idea de Newton que expone: las fuerzas centrífugas solamente son observables si tenemos en cuenta un espacio inmóvil y absoluto. De acuerdo con dicho argumento, Mach procede a establecer el carácter relativista de la situación y a establecer un punto de análisis, donde no necesariamente se acude a explicar el movimiento y las fuerzas centrífugas e inerciales bajo la mirada de un espacio absoluto.

Ahora bien, desde la perspectiva del análisis del experimento newtoniano, Mach afirma que las fuerzas inerciales de las paredes del balde (espacio absoluto) deben de tener algún tipo de interacción entre los cuerpos materiales, como es el caso balde-agua. Y que de una u otra manera la materia estelar tiene cierta interacción con la materia inmediata, deshaciendo un aparente vínculo causal en la relación inercial y espacio absoluto (inmóvil).

Como lo hemos venido tratando, la filosofía empirista de Mach adquiere la noción de espacio y tiempo en términos pre-relativista, bajo el marco establecido de la ley de la inercia. Dicha relación alcanza a dar explicación de la posición y movimiento de los objetos en sentido donde se esté observando, mencionando el conjunto de posiciones o movimientos como relativos. Pues de esta manera, Mach concreta una ley fundamental sobre la teoría de los movimientos inerciales, especificando que todo movimiento es relacional con la determinación de la materia circundante, y en función a las distintas interacciones que pueda tener con la distribución de masa total (Guerrero & Cala, 2010, pág.18).

Mach, bajo la postura de la experiencia establece sus nociones de espacio, tiempo y movimiento como un argumento estricto para colaborar con la empresa de la ciencia, pues a través de sus objeciones epistemológicas y carácter ontológico desarrolla una teoría acerca del problema de la inercia, conllevándolo a dar solución desde la perspectiva relacional y relativista. Cabe distinguir que la noción de empresa científica que propone Mach está acorde en distinguir y tener criterios válidos para objetivar leyes y postulados, cuyas ideas y experiencias no pueden estar dependientes a las apariencias y suposiciones ontológicas e interpretativas que pueden subyacer de las nociones metafísicas, pues corre el riesgo de que las teorías científicas estén sesgadas bajo creencias equivocadas, permitiendo que se cueen diversos tipos de errores.

En conclusión, el concepto de espacio físico para Mach no puede ser absoluto, ya que las relaciones y composiciones de la materia son la base de la experiencia para detallar los movimientos relativos. Por otra parte, el espacio geométrico como la composición de los marcos inerciales, Mach rechaza cualquier idea de reposo y movimiento absoluto, pues la experiencia no detalla dichas relaciones de acuerdo con la distribución de la materia en el universo.

2.3 Minkowski, una interpretación geométrica del espacio-tiempo

Las teorías absolutistas enmarcadas en el siglo diecisiete y dieciocho fueron influenciadas por autores como Newton y Kant, detallando la concepción de la geometría euclidiana como la más exacta para entender y dar explicación al concepto de espacio. Pues dicha geometría subyace del carácter apodíctico¹⁵ para estructurar nociones elementales que describen el espacio absoluto y a

¹⁵ Apodíctico: significa el acompañamiento de la conciencia en dar explicación a las necesidades (verdad que no deja discusiones).

priori que se menciona en sus más célebres publicaciones, “la geometría, sostiene Kant, es una ciencia que establece las propiedades del espacio sintéticamente y, no obstante, a priori”. (Guerrero & Cardona, 2010, pág.33)

Dicho lo anterior, el paradigma seguía incursionando en las teorías absolutistas, contemplando la geometría como un sinónimo de la geometría euclidiana, rechazando toda representación geométrica no-euclidiana por carecer de forma y sensibilidad pura. En este sentido, el auge de las geometrías no-euclidianas dio un salto importante a comienzos del siglo diecinueve (XIX) tras la reconsideración de contemplar un espacio y tiempo desde diferentes perspectivas y concebir varios sistemas geométricos internamente consistentes, uno de los primeros pioneros en argumentar el estudio de las geometrías no-euclidianas, fue el físico y matemático post-kantiano Carl Friedrich Gauss, quien argumentó que la noción de la pura espacialidad no era inducida y deducida a priori, sino que también procedía de la experiencia (a posteriori) y del hecho receptivo que procede la capacidad de confirmar dichos axiomas o postulados. Gauss después de verificar y confirmar sus hipótesis con relación a las geometrías no-euclidianas, se privó de publicar dichos resultados por temor a la reacción de la comunidad kantiana.

Después de dicho paradigma, se reconoció e investigó varias herramientas matemáticas que dio a luz la posibilidad de explicar la naturaleza fenomenológica, procediendo a dar un gran paso al embarcamiento de un nuevo camino por reconocer y estudiar nuevas geometrías, como es el caso de Nikolái Lobachevski (1792-1856) y János Bolyai (1802-1860) geómetras no-euclidianos que resaltaron el estudio por la geometría métrica, euclídea y no euclídea, que luego retomaría Félix Klein (1849-1925). (Guerrero & Cardona, 2010, pág.34)

Esta sección procederá a detallar el análisis conceptual de espacio-tiempo que se obtiene a través de la formalización matemática de la geometría de Hermann Minkowsky¹⁶, estableciendo la dependencia de dos entes físicos (espacio y tiempo) conllevando el desarrollo y desencadenamiento de dichos paradigmas antes expuestos en la mecánica clásica, y como resultado la obtención de una estructura más formal de la teoría especial de la relatividad.

¹⁶ Hermann Minkowsky (1864-1809). Matemático ruso de origen lituano desarrollo varios avances de acuerdo a la geometría no-euclidiana, teoría de números y contribuyo con la física matemática y teoría de la relatividad.

En el año 1908, tres años después de la publicación de la TER (1905), se hizo pública una de las herramientas geométricas no-euclidianas que podía explicar el continuo espacio-tiempo de la teoría de Einstein, especificando que el espacio y tiempo no eran dos entes independientes, sino que, por el contrario, son dos entes dependientes uno del otro, nombrando a su nuevo espacio geométrico tetradimensional. En palabras de Minkowsky:

De aquí en adelante el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, serán condenados a desvanecerse entre las meras sombras, y sólo una clase de unión de las dos se preservará como una realidad independiente. (Minkowski, 1952, p.75)

2.3.1 Diagramas del espacio-tiempo

En esta sección, es importante resaltar la importancia de los diagramas de la geometría de Minkowski, ayudando aclarar las ideas físicas y matemáticas de la dependencia del espacio y tiempo, observando distintas características que pueden obtener los objetos uno con referencia a otro de manera gráfica.

Como ya lo hemos venido especificado, la geometría euclidiana se distingue bajo la variedad de estar compuesta por tres dimensiones, pues un punto que esté ubicado en dicho espacio tiene la propiedad de tener tres coordenadas espaciales (x , y , z). Ahora bien, la métrica que define un par de puntos es la distancia que hay entre ellos, en este caso los llamaremos punto A y punto B los cuales están representados en un plano de simultaneidad¹⁷ llamado S, como se ilustra en la figura 2.2. La métrica x_1 hace referencia al eje de la y , la métrica x_2 hace referencia al eje de la x , y la métrica x_0 representa la dimensión temporal (se ha suprimido la coordenada x_3 eje de la z).

Para un espacio Euclidiano de tres dimensiones el tiempo es absoluto e independiente del espacio, de esta manera no se procede a representar el tiempo en un plano euclídeo (plano cartesiano). Newton por el contrario suprimió una coordenada espacial para representar el tiempo

¹⁷ El concepto de simultaneidad de la figura 2.2, representa el mismo intervalo de tiempo, descrito por la métrica x_0 para el punto A y B (eventos), teniendo en cuenta que el tiempo es absoluto (planos de simultaneidad absoluta) para la teoría de galileo y de Newton. véase fundamentos del espacio-tiempo. Friedman, M, 1991, p.102.

absoluto del espacio, nombrando la coordenada temporal plano de simultaneidad absoluto para dos, como se puede observar en la figura 2.2 la coordenada x_0 .

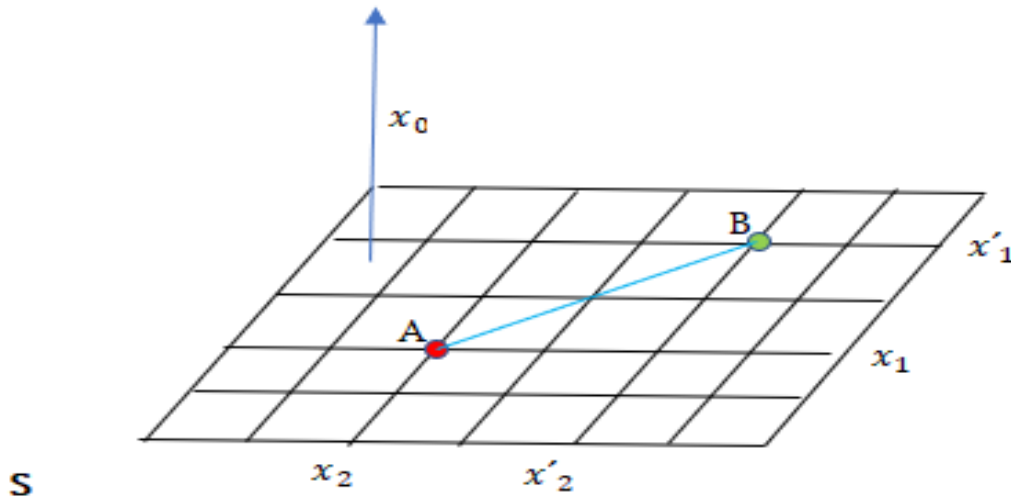


Figura 2.2: Representación gráfica de la métrica del punto A y B en un plano de simultaneidad S.

De acuerdo con la geometría euclidiana la métrica está en función del $ds(A,B)$, ahora procedemos aplicar la relación pitagórica a las coordenadas espaciales, obteniendo:

$$(ds)^2 = (x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + (x_3 - x'_3)^2 \quad (2.1)$$

Siendo $A = (x_1, x_2, x_3)$ y $B = (x'_1, x'_2, x'_3)$, y x_0 representa el tiempo unidimensional. En este caso la componente x_0 no está en la métrica del intervalo cuadrado por la razón de que el espacio y tiempo son dos componentes independientes, suponiendo un tiempo absoluto e igual en todos los puntos del espacio. En este sentido, sí tenemos en cuenta que A y B están en planos diferentes, la métrica no puede estar definida.

Cabe aclarar que para la métrica del plano $ds(A,B)$ no se tiene en cuenta la coordenada x_0 , por razones de que el tiempo siempre será igual para los dos puntos, en este caso el tiempo nunca variará entre las distancias permanencia igual para cualquier evento o punto de referencia que este dentro del mismo plano (espacio).

Por otra parte, la geometría de Minkowski explica de forma general que los puntos del espacio se denominan eventos, y están representando en diagramas de la dependencia del espacio-

tiempo. Dicho lo anterior, la representación de los diagramas está caracterizados por un plano geométrico que indica la dependencia de las tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal, dando consigo mismo la formalización de las cuatro coordenadas en un plano cartesiano (x, y, z, t), es decir $x_1 = x ; x_2 = y ; x_3 = z ; x_0 = t$. Por temas de complejidad la representación de los diagramas procede a suprimir una coordenada espacial para poder detallar la coordenada temporal.

Tal y como lo menciona Vélez (2012) en su libro, *apuntes de la relatividad*, es necesario estipular el segundo postulado de la teoría especial de la relatividad como esencia principal para describir la geometría de Minkowski.

Para las coordenadas en el espacio tridimensional, un punto está determinado por tres coordenadas respecto a tres ejes, y en un espacio tetradimensional un punto está determinado por cuatro coordenadas que acuden a un nuevo grupo de transformaciones, por esta razón en lugar de hablar de puntos en el espacio tridimensional se habla de eventos en el espacio-tiempo. (Vélez, 2012, p.155)

El segundo postulado de la TER menciona que la velocidad de la luz se propaga en el vacío con una velocidad C independiente del estado del movimiento del emisor (constancia de la velocidad de la luz). “Existe una velocidad que no puede ser superada por ningún objeto material”. (Einstein, 1952, p.38).

La estructura de los diagramas espacio-tiempo, se pueden mostrar en primera instancia por dos coordenadas espaciales (z, x), y una coordenada (t) representadas en un plano S . La historia de una partícula en reposo en el plano (z, x) es representada por una línea que esta paralela de acuerdo con el eje del tiempo como se muestra en la figura 2.3.

De acuerdo con lo anterior, Minkowski toma en cuenta el segundo postulado de la TER para adaptarla en su geometría no euclidiana, relacionando el eje temporal con la constancia de la velocidad de la luz, explicando que la noción de espacio y tiempo tienen que estar definida con la misma métrica, este tema se retomara más adelante.

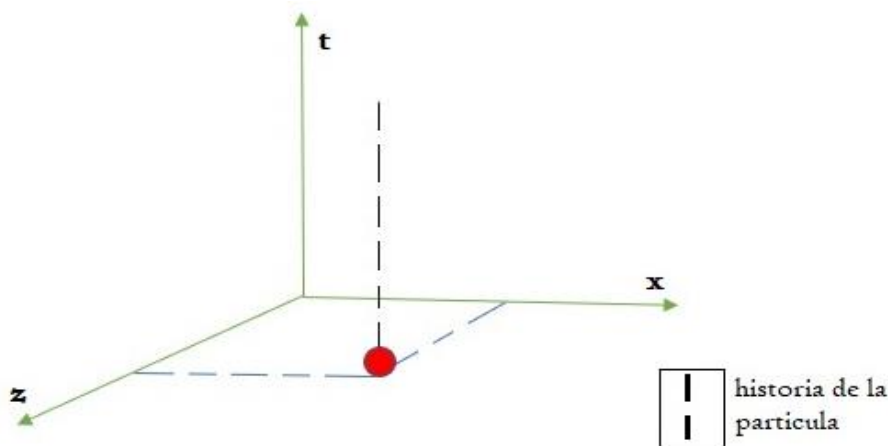


Figura 2.3: Representación gráfica de la línea del universo de una partícula en el plano (z, x)

Como se puede observar, la partícula no cambia su posición espacial en el plano (z, x), pero si cambia su posición temporal, trazando una línea que une todos aquellos puntos que se denominan eventos consecutivos, registrando la historia o lapso de vida de la partícula. Dicha línea se le atribuye el nombre; historia de la partícula o línea del mundo. (Cardona & Guerreo, 2010).

En los diagramas de espacio-tiempo de Minkowski, el tiempo deja de ser absoluto a diferencia de la teoría newtoniana, en este caso la geometría de Minkowski toma en cuenta cada intervalo de tiempo, construyendo una historia para cualquier objeto o partícula.

Como ya antes lo habíamos mencionado con relación a la métrica de dos puntos, Newton establece un plano de simultaneidad (tiempo) igual para todos los puntos o marcos de referencia, sin describir una historia o un suceso con relación al tiempo, en cambio para los diagramas de espacio-tiempo de Minkowski los planos de simultaneidad no son absolutos e iguales para todos los eventos, por lo contrario son dependientes de un marco inercial, conllevando a que cada objeto o partícula tenga un propio plano de simultaneidad.

Dicho lo anterior, cabe resaltar que las propiedades del espacio de Newton y de Minkowski es aparentemente llano (plano), conllevando a que la luz del objeto se propague en línea recta en las coordenadas¹⁸ (ct, x) como se ilustra en la figura 2.4.

¹⁸ La coordenada ct es el eje vertical que representa el tiempo luz, y el eje horizontal es la coordenada espacial x.

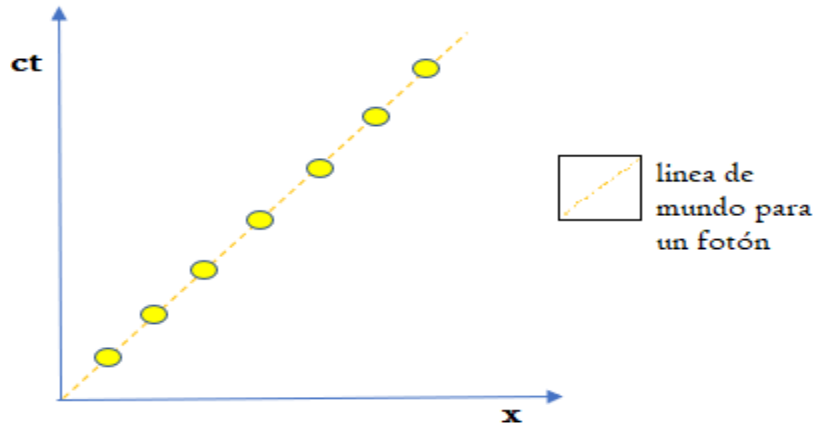


Figura 2.4: Diagrama espacio-tiempo para un fotón de luz.

En la figura 2.4 observamos que la línea del mundo del fotón está representada de forma diagonal con respecto a la coordenada espacial x (horizontal) y la coordenada temporal ct (vertical), dando inicio del trayecto en las coordenadas $x = 0$ y $ct = 0$. Cada punto del plano (x, ct) representa un evento para dos observadores, conllevando a imaginar varias hipótesis que a continuación se nos presentan. Como lo menciona Rodríguez:

Dos eventos se pueden representar de forma distinta vistos por un mismo observador, siendo un par de eventos distintos que ocurren en el mismo lugar, pero en diferentes tiempos, igualmente se puede representar un par de eventos en un tiempo igual, pero en distintos lugares, y estos dos mismos eventos distintos ocurren en tiempos diferentes en lugares diferentes. (Rodríguez, 2012 p.4.)

Teniendo en cuenta lo anterior, ya reconocemos las líneas del mundo para un observador que está en reposo, como también las líneas del mundo para un objeto que está en movimiento, ahora procederemos a explicar una situación detallada para afirmar lo antes dicho. A continuación, describiremos un diagrama espacio-tempo que nos ilustre los eventos que cada observador puede medir.

Consideremos una persona que va comiendo en un bus en movimiento. Inicialmente la persona saca las onces que había guardado después de salir del trabajo, después de haber sacado las onces, empieza a comer su postre y finalmente se bebe el jugo. Todos estos sucesos ocurren en un mismo lugar (silla del bus) respecto al bus, pero en tiempos diferentes. Por otra parte, desde un

observador que está en tierra, el hombre saca las onces y luego bebe el jugo a kilómetros de distancia (ver figura 2.5). De acuerdo con lo anterior, (Gamow, 1971, p.143) explica el ejemplo, diciendo: “Sucesos que ocurren en el mismo sitio, pero en diferentes tiempos en un sistema, acontecen en diferentes lugares cuando son observados desde otro sistema que se mueve respecto al primero”.

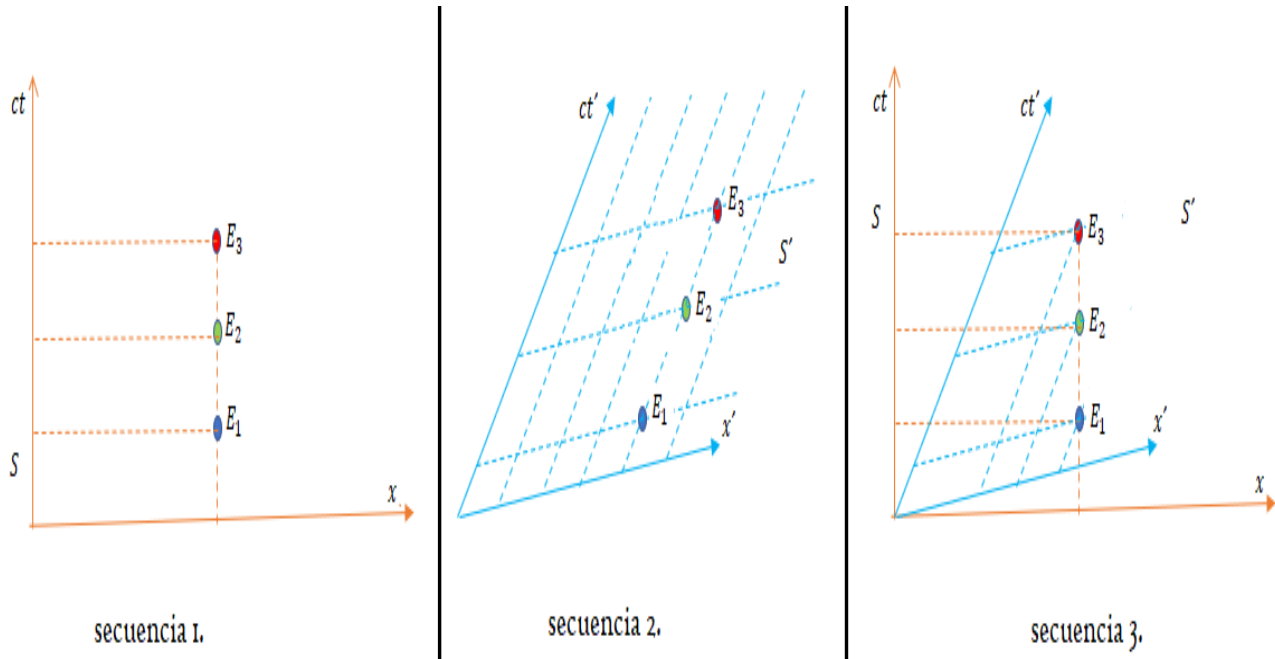


Figura 2.5: Diagramas de espacio-tiempo, representación de dos marcos de referencia s y s' . El evento 1, representa el evento en donde está sacando las onces, el evento 2 cuando se come el postre y finalmente el evento 3 cuando bebe jugo.

En la figura 2.5 se ilustra tres secuencias, la primera secuencia muestra el diagrama espacio-tiempo del observador que está en reposo en el plano S , observando los eventos de la persona que va en el bus. La segunda secuencia muestra el bus en movimiento con la persona que se está comiendo las onces en un plano S' , y por último la tercera secuencia es el diagrama espacio-tiempo del plano S y S' reunidos.

Como se puede observar en la figura 2.5, el observador que está en reposo se encuentra localizado en un marco de referencia, en donde solo puede detallar un cambio únicamente en el tiempo (ct), concluyendo que tiene la misma posición, pero en tiempos diferentes. Por otra parte, la secuencia 2, que pertenece al segundo observador esta cambiando constantemente en las dos

coordenadas (x, ct) , trazando una trayectoria diagonal. Ahora bien, como cada marco de referencia es independiente uno del otro, las líneas del mundo también proceden a ser independientes estableciendo que los eventos ocurren en lugares y tiempos diferentes.

Dicho lo anterior, Minkowski explica; una persona en reposo y otra en movimiento contiene planos de simultaneidad diferentes. Para un marco inercial en reposo sus planos de simultaneidad serán paralelos, e igualmente para un marco inercial en movimiento. Ahora bien, si trazamos los planos de simultaneidad de un marco inercial en reposo y del marco inercial en movimiento en un mismo plano, observaremos que uno con respecto a otro tomara una forma diagonal, como se observó con las líneas del mundo en la secuencia 1 y en la secuencia 2 de la figura 2.5.

De acuerdo con lo anterior, Minkowski genero un rompimiento en los postulados de Euclides, generando una relación dependiente del espacio y tiempo. Por otra parte, el origen de una nueva geometría iba a estar encaminada al estudio de la geometría hiperbólica, ligada al cambio de coordenadas de un plano de simultaneidad a otro. De esta manera la geometría hiperbólica empezara a ocupar los escenarios físicos y matemáticos, explicando conceptos de la TER que se abordaran más adelante.

A continuación, el concepto de espacio y tiempo estará estructurada de una manera lógica y matemática, a partir de los análisis anteriores, dando a conocer el tratamiento que conlleva a interpretar la dependencia de un espacio-tiempo.

Minkowski después de haber analizado los diagramas de espacio-tiempo, enfatizo su conocimiento para estructurar una métrica que estuviera dependiente del tiempo, para esta situación usa un tratamiento pseudo-euclidiano, representándolo de la siguiente manera:

$$r = (ct, x, y, z) \longrightarrow r = (ict, x, y, z) \quad (2.2)$$

Por medio de la geometría pseudo-euclidiana se puede analizar detalladamente los diferentes eventos de los marcos de referencia inercial, analizando sus posibles trayectorias por medio de las líneas de mundo (líneas del universo).

La métrica de Minkowski representa la coordenada temporal en la métrica de una distancia espacial euclidiana. De acuerdo con lo anterior, la distancia de un espacio tetradimensional se mide por medio de los siguientes puntos $ct, x, y, z; ct', x', y', z'$ que relaciona la métrica pseudo-euclídea.

$$S^2 = c(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 \quad (2.3)$$

Si se considera dos marcos S y S' cuyas coordenadas t, x, y, z; t', x', y', z' (eventos) se encuentran infinitesimalmente desplazados uno por el otro, podemos establecer la siguiente relación.

$$ds^2 = cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad ^{19} \quad (2.4)$$

En este breve recuento sobre el espacio-tiempo como dos entes dependientes a través de la geometría de Minkowski, también expone que el “tiempo imaginario” debe comportarse de la misma manera como las dimensiones espaciales, en donde no descarta la posibilidad de moverse en la dimensión temporal como se hace en las tres dimensiones espaciales, de atrás hacia adelante, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. En este sentido, el tiempo se representa de forma perpendicular al tiempo “normal” que acompaña la métrica, explicando el principio causal y no euclídeo.

La longitud de una curva en el tratamiento de un espacio tetradimensional (4-D) es igual que la de un espacio tridimensional (3-D). Ahora con la geometría espacio-tiempo será de igual manera, pero con la diferencia en la pseudo-métrica que compone la signatura (- + + +). Como se representa a continuación.

$$dl^2 = (icdt)^2 + (dx)^2 + (dy)^2 + (z)^2 \quad ; \quad i^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$$

$$dl^2 = i^2 c^2 dt^2 + (dx)^2 + (dy)^2 + (z)^2$$

$$dl^2 = -c^2 dt^2 + (dx)^2 + (dy)^2 + (z)^2 \quad (2.5)$$

De acuerdo con el intervalo, análogamente se puede decir que para las coordenadas de dos sistemas (ict, x, y, z) y (ict', x', y', z') que están en movimiento se encuentran detalladas por las

¹⁹ La métrica de Minkowski está dada por el signo negativo por ser un espacio-tiempo tetradimensional pseudo-euclídiano. La coordenada temporal se representa como una coordenada imaginaria **ict**, en donde **i** va ser una rotación de coordenadas y **c** sera la velocidad de la luz.

ecuaciones de transformación de Lorentz²⁰, sugiriendo que el movimiento relativo uniforme entre dos sistemas de referencia puede interpretarse como una rotación, no en el espacio cartesiano, sino en el espacio-tiempo, detallando el número $i = \sqrt{-1}$ como rotación del espacio-tiempo (ict, x, y, z), y no del espacio cartesiano (x, y) (Sepúlveda, 2003).

De acuerdo con la signatura del intervalo dl^2 (- + + +) se considera de tipo espacial, siendo positiva para los desplazamientos de género espacial. Ahora conviene hacer un tratamiento en donde se verifique la signatura del intervalo del tiempo como positiva representándola de la siguiente manera (+ - - -).

$$dS^2 = c^2 dt^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (z)^2$$

$$dS^2 = c^2 dt^2 - [(dx)^2 + (dy)^2 + (z)^2] \quad (2.6)$$

La interpretación de la signatura (+ - - -) y (- + + +) del espacio y tiempo constituye un significado acorde a los diagramas de espacio-tiempo, cuando la signatura (+ - - -) temporal queda expresada en términos del signo positivo, quiere decir que el intervalo temporal toma todos los valores positivos acorde a su eje de la coordenada (+ct), pero cuando la signatura queda en término negativo toma todos los valores negativos respecto a su eje de coordenada.

A continuación, la siguiente figura 2.6 representa las líneas del mundo para un rayo de luz, formando una especie de cono de luz en el diagrama espacio-tiempo. En dicho diagrama del cono de luz procederemos a ilustrar el género del tiempo y el género del espacio explicando sus respectivas funciones. Cuando el intervalo del tiempo es positivo se traza una línea recta sobre el eje (ct), representando los diferentes eventos que puede acontecer. Por otra parte, cuando el intervalo del espacio y tiempo es nulo, se corresponde a trazar una línea sobre las mismas líneas que conforman el cono de luz, especificando que no tiene ningún evento en el espacio ni en el

²⁰ Usando las transformaciones de Lorentz con los parámetros de los ángulos de Euler puede ser vista como una rotación en el espacio complejo (ict).

tiempo. Y por último cuando el género espacial es positivo este es representado sobre el eje de las x , evidenciando distintos eventos en una dimensión espacial.

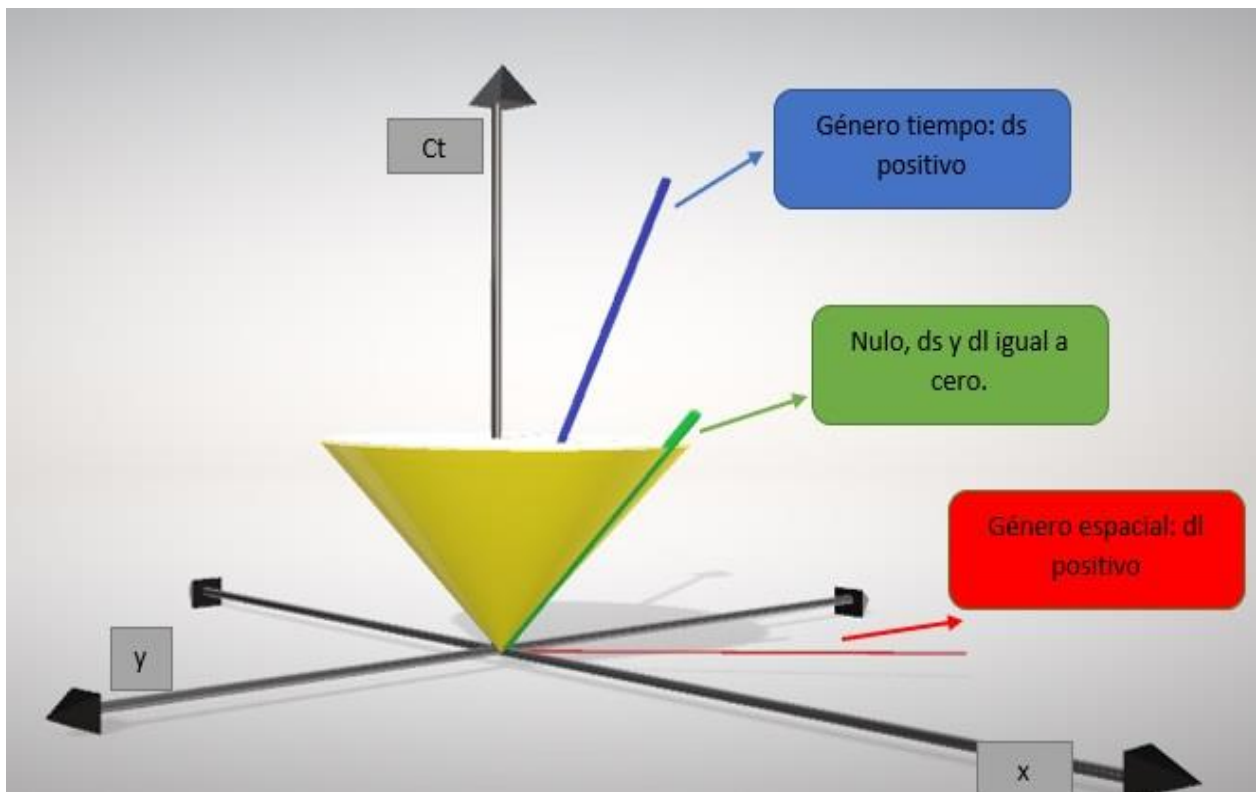


Figura 2.6 Geometría de Minkowski, el espacio dl proporciona una medida (distancia) para los desplazamientos espaciales. El desplazamiento temporal ds se encuentra dentro del cono de luz proporcionando una medida temporal. Y para el desplazamiento nulo, se representa a lo largo del cono cuando dl y ds son iguales a cero.

De acuerdo con lo anterior, Minkowski detalla una dimensión temporal igual que una dimensión espacial con propiedades físicas y matemáticas, cuyas funciones es participar de los diferentes acontecimientos o eventos de acuerdo con los marcos inerciales. En esta sesión se evidencio que el tiempo también puede poseer características negativas como el espacio, reflejando que el carácter absoluto newtoniano no es el mas apropiado para explicar los diferentes sucesos vistos en la geometría de Minkowski.

Resaltando y retroalimentando lo anterior, se puede decir:

- Los diagramas espacio-tiempo evidencia los diferentes eventos que puede acontecer una partícula.

- La geometría de Minkowski señala una dependencia del espacio y tiempo respecto a los diferentes marcos inerciales.
- El intervalo temporal es considerado como una dimensión física, teniendo propiedades matemáticas.
- El espacio y el tiempo ya dejan de ser dimensiones independientes, para conformar una dependencia de cuatro dimensiones.

2.4 El auge de la teoría especial de la relatividad y el cimiento del espacio-tiempo

La teoría especial de la relatividad fue expuesta en el año 1905 por el físico alemán Albert Einstein quien contribuyó con el desarrollo de la física moderna (TER, TGR)²¹. Einstein influenciado por las teorías absolutistas de Newton y bajo el influjo de la geometría euclidiana que defendió Kant argumentando que el espacio y tiempo son formas puras de la sensibilidad (a priori), Einstein colocó en contraposición dichas teorías y discusiones de autores bajo la postura del filósofo Ernst Mach, siguiendo con su más celebre crítica sobre el concepto absoluto del espacio y tiempo. Pues para Mach era imposible concebir experimentalmente cuerpos en reposo y en movimiento absoluto, proclamando que las ideas de Newton carecían de práctica experimental seducido por influjo de suposiciones.

De acuerdo con lo anterior, Einstein sigue rigurosamente la idea de Mach haciendo énfasis en que todo reposo o movimiento está relacionado con los cuerpos materiales (distribución de materia), mencionando la posición de los cuerpos como espacios relativos. En este sentido, todo reposo o movimiento es considerado relativo e independiente de una magnitud de mínima o gran escala.

²¹ La Teoría especial de la relatividad fue publicada en el año 1905, y diez años más tarde se publicaría la Teoría general de la relatividad (1915).

2.5 Ideas previas acerca de la teoría especial de la relatividad

La teoría especial de la relatividad nace bajo la construcción y estudio de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, detallando que la teoría clásica estipulaba reposos y movimientos absolutos para los objetos. En este sentido, cuando se dio investigación sobre los fenómenos electrodinámicos, en este caso para los objetos mecánicos no se evidenciaba dichas afirmaciones del absolutismo, “más bien sugieren que, como ha sido demostrado hasta el primer orden en cantidades pequeñas, las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica son válidas para todos los sistemas de referencia en los que las ecuaciones de la mecánica funcionan”. (Einstein. 1905, p.2)

Dicho lo anterior, la mecánica newtoniana funcionaba para medidas y cantidades pequeñas, en este sentido, cuando se quería estudiar una propiedad a escala grande como la velocidad de los cuerpos electrodinámicos la teoría newtoniana mostraba inconsistencias. Uno de los más claros ejemplos, fue la hipótesis de contracción de longitudes que exponía Lorentz, cuando detallaba que el campo eléctrico de una carga se veía afectado por un factor llamado gamma γ , puesto que las distancias en movimiento, si son resultado del equilibrio electrostático interno, también se verán afectadas en ese factor. (Pérez, 2017. p.5)

Luego de describir la contracción de las longitudes, Lorentz buscaba una interpretación electromagnética para la mecánica, siendo poco detallado con sus explicaciones y relaciones conforme a la teoría. Después de esto, Einstein explico de manera formal la contracción de las longitudes haciendo una reflexión sobre los principios de la relatividad, de esta manera el aceptar los dos postulados eran el primer paso para dicha explicación.

Einstein colocó como ejemplo, sea una barra estacionaria rígida; sea su longitud L , medida con una regla también estacionaria (marco de referencia en reposo). Ahora imaginamos que el eje de la barra está a lo largo del eje de las x del sistema estacionario de coordenadas, y que se da a la barra un movimiento uniforme de traslación con velocidad (v) a lo largo del eje x , en la dirección creciente de x . Ahora nos preguntamos por la longitud de la barra en movimiento, e imaginamos que su longitud es obtenida por medio de las dos operaciones siguientes:

(a) El observador se mueve junto con la regla y la barra a medir, y mide la longitud de la barra directamente superponiendo la regla, justamente de la misma manera que si los tres estuvieran en reposo.

(b) Por medio de relojes estacionarios instalados en el sistema estacionario y sincronizados de acuerdo con L, el observador comprueba en qué puntos del sistema estacionario están los extremos de la barra a medir en un tiempo definido.

La distancia entre esos dos puntos, medida por la regla ya empleada, que en este caso está en reposo, es también una longitud que puede ser designada como “la longitud de la barra.” (Einstein, 1905, p.4)

De acuerdo con lo anterior, Einstein recurrió al principio de la relatividad, diciendo que la longitud de la barra en movimiento ($L(v)$) tenía que ser igual que a la longitud de la barra cuando estaba en reposo L (estacionaria), y que por medio de la operación determinaría en base a los dos principios de la relatividad que la longitud de la barra L era diferente.

Einstein después de las 4 publicaciones que hizo en 1905 innovó una teoría contundente de la física, explicando fenómenos ligados a una concepción espacial y temporal con relación a su teoría, como lo mencionaremos en el transcurso de este capítulo.

2.4.2 La causalidad y los planos de simultaneidad en la teoría especial de la relatividad.

En la teoría clásica, Newton estipula la relación causa y efecto de un evento con la causalidad, pues si es bien los diferentes eventos son causados por unos ya anteriores que son explicados por la física (Hernández,2017). La teoría de la mecánica clásica postula que todas las causas producen un efecto en relación con el tiempo absoluto conllevando a decir que toda acción a distancia es instantánea, es decir toda causa es simultánea con todo efecto.

El estudio de la causalidad y la simultaneidad para las teorías modernas tiene origen en un contexto histórico y social, donde las ideas y aportes dejan de ser tratadas como absolutas. En el año 1905 el surgimiento de la teoría especial de la relatividad coloca en contradicción dos posturas totalmente divididas sobre la creencia de la dependencia e independencia del espacio y tiempo,

conllevando a fortalecer y a sesgar la teoría en diferentes contextos²². En el año 1905 y posterior a este año era muy difuso el panorama de los físicos en reconocer entre la teoría de Maxwell-Lorentz y la relatividad de Einstein. (Sánchez, 1983)

Luego del pronunciamiento de Minkowski, rescató varios aportes de la teoría de Einstein, quien no desligo que su teoría no había sido totalmente independizada de la teoría de Lorentz. Diciendo²³.

H. A. Lorentz encontró el teorema de la relatividad y creo el postulado de relatividad como una hipótesis de que los electrones y la materia experimentan como consecuencia del movimiento, contracciones de acuerdo con dicha ley.

A. Einstein preciso la expresión en el sentido de que este postulado no es una hipótesis arbitraria, sino que más bien constituye el fenómeno de un nuevo, más refinado entendimiento del tiempo.

El principio de relatividad en mi sentido no ha sido hasta ahora para la electrodinámica de cuerpos en movimiento. En el presente trabajo después de formular este principio, lo utilizo para obtener las ecuaciones fundamentales de los cuerpos en movimiento, en una forma que estas ecuaciones han tomado y verifican en forma precisa este principio (Minkowski,1908).

Dicho lo anterior, Minkowski afirma que la teoría de contracción de los cuerpos ha dejado de ser una hipótesis para convertirse en un postulado que constituye un fenómeno natural, cuya influencia de los estudios de Poincaré también ha generado de cierto modo el rompimiento de los postulados de Euclides.

²² “En el año 1906 en la reunión de la sociedad de científicos de la naturaleza y médicos alemanes, Arnold Sommerfeld sugería que los físicos menores de cuarenta años preferirían << el postulado electrodinámico>>, mientras que los mayores de cuarenta se inclinarían por el << postulado mecánico-relativista>>” véase **El origen y desarrollo de la relatividad**. Sánchez. José, p.86.

²³ La TER es la forma más adecuada para explicar la cinemática, pero no la dinámica correcta. La TER fue estudiada solo por el panorama de la electrodinámica, excluyendo todos los movimientos físicos de los cuerpos, tendiendo a ser limitada. Minkowski amplía la visión argumentando que la TER es compacta con toda teoría física.

El físico A. Einstein con una de sus cuatro publicaciones que envió a la revista *Annalen der Physik*. El tercero de ellos “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”²⁴ rompió el paradigma de las teorías absolutistas, concibiendo un nuevo concepto para el espacio y tiempo. Con base a lo anterior, cabe preguntarse ¿En que influye la teoría especial de la relatividad con la causalidad y simultaneidad?

La teoría de la relatividad especial establece dos postulados esenciales para explicar la simultaneidad de los eventos espacio-temporal, estructurando su teoría bajo el criterio de los marcos inerciales. El primer postulado de la TER hace noción sobre las leyes de la física, argumentando que todas las leyes de la física deben de ser igual para todos los marcos inerciales. El segundo postulado hace mención de la constancia de la velocidad de la luz que se propaga en el vacío rectilíneamente con la misma velocidad en todo tiempo, en todas las direcciones, en todos los marcos inerciales (Vélez, 2012).

Einstein para llegar a una concepción básica de simultaneidad de acuerdo con la teoría newtoniana supuso un grupo de coordenadas, en que las ecuaciones de la mecánica fueran válidas, de acuerdo con lo dicho, estableció el sistema de coordenadas como un sistema estacionario. Ahora, Einstein procedió a detallar un punto en reposo sobre el sistema estacionario explicando; su posición puede definirse relativamente utilizando un sistema de medición rígido, o con el método de la geometría euclidiana se puede expresar en coordenadas cartesianas.

Ahora bien, de acuerdo con el anterior ejemplo procedemos a colocar un objeto en movimiento, cuyas características le asignamos valores a sus coordenadas en función del tiempo, dicho objeto se encuentra en un punto A, a las 9 según su reloj, y un punto B se encuentra en un lugar muy lejos indicando la misma hora, en este sentido los eventos que el observador A registra no son los mismos eventos que registra B indicando que tienen una dependencia horaria, pero que al mismo tiempo son independientes de los eventos presentados.

De acuerdo con lo anterior, el principio de simultaneidad en la mecánica clásica relaciona el tiempo absoluto con los marcos inerciales, pues dicho tiempo es independiente de la posición

²⁴El artículo “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, son las ideas básicas de la teoría especial de la relatividad.

espacial e igual para todo marco inercial relacionando un pasado y un futuro común universal. Dicho lo anterior, entonces el plano de simultaneidad es igual para todos los observadores y eventos. Para la teoría especial de la relatividad hay cierta desvinculación de la teoría Newton, pues el espacio y tiempo dejan de ser independientes para formar el tejido espacio-tiempo tetradimensional como ya antes se había mencionado en la geometría de Minkowski.

A continuación, representamos los diferentes planos de simultaneidad para la teoría de la mecánica clásica (figura 2.7), en donde se verifica que el observador A y el observador B se encuentra en un espacio cuyo plano de simultaneidad es homogéneo e independiente de la posición o velocidad que tenga cualquier observador.

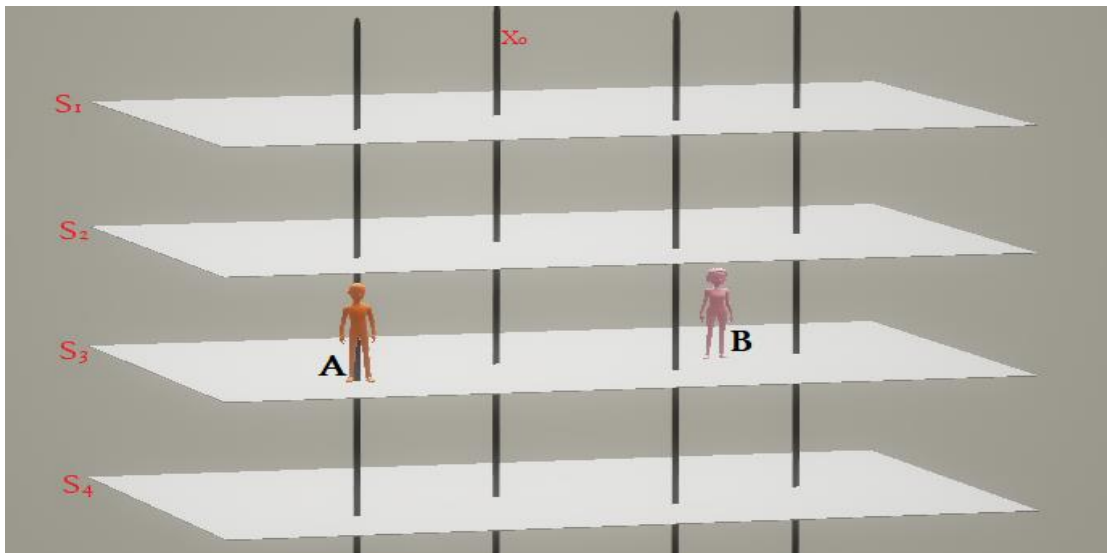


Figura 2.7: Diagramas de simultaneidad de la mecánica clásica, para dos observadores con diferente posición, pero con un plano de simultaneidad igual (pasado, presente y futuro común para dos observadores).

Por otra parte, la geometría de Minkowski acude a solucionar el planteamiento de la TER, relacionando las líneas de mundo para cada observador, estableciendo que los planos de simultaneidad son dependientes de cada marco inercial. El segundo postulado de la TER determina que para cada observador existe un “pasado” y un “futuro”, delimitados por un cono de luz. Dicho lo anterior, la representación geométrica de un cono de luz detalla la historia de un evento en el espacio-tiempo como se observa en la figura 2.8. En este sentido el cono de luz superior representa el futuro del observador A (evento), y el cono inferior representa el pasado de este mismo,

resaltando que la intersección de dichos conos del futuro y del pasado me indican el presente “ahora” del observador. Ahora bien, siguiendo el segundo postulado de la TER ningún cuerpo puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, siendo los vértices del cono como la velocidad limite. Los eventos C y B están dentro del cono de luz y los eventos D y E por fuera del cono de luz.

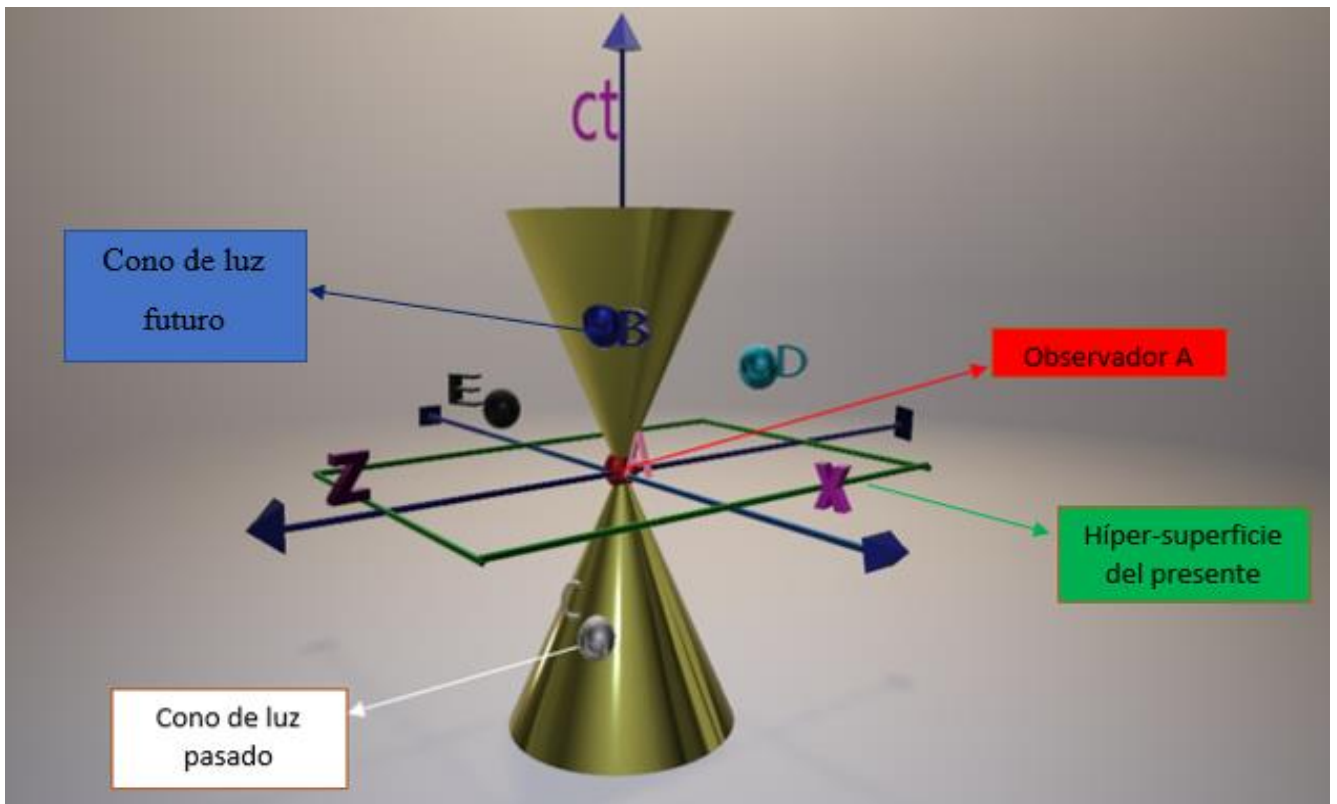


Figura 2.8: Representación geométrica de un cono de luz de Minkowski (pasado, presente y futuro), donde el pasado es el cono inferior del plano de la hiper-superficie, el cono superior representa el futuro, y la intersección es el presente del evento (observador A).

Es preciso abrir un paréntesis pequeño y detallar el cono de luz con la interpretación antes mencionada con la signatura del tratamiento matemático que se había hecho en la métrica de Minkowski (página 41), explicando y detallando su comportamiento. De esta manera cuando la signatura del intervalo del tiempo es negativa $(- + + +)$ pertenece al cono de luz del pasado, en conclusión, puede ser los diferentes eventos ocurridos en el pasado de un observador. Y cuando la signatura del intervalo del tiempo es positiva $(+ - - -)$ pertenece al cono de luz del futuro, perteneciendo a cualquier evento del futuro relacionado con el observador.

De acuerdo con la imagen 2.8, los eventos A “presente” y B “futuro” pueden ser conectados por una señal que viaje a una velocidad menor o igual que la velocidad de la luz, denominando esto como una relación causal entre diferentes eventos. El evento C como se puede observar hace parte del cono del pasado espacio-tiempo del evento de A, como estos dos eventos están dentro del mismo cono pueden estar conectados también por una señal menor o igual que la velocidad de la luz. Y por último los eventos D y E se encuentran en una región que no hace parte del cono de luz del evento de A, dicha consecuencia los eventos D y E no pueden ser conectados por ninguna señal como lo especifica la constancia de la velocidad de la luz (segundo postulado de la TER), pues se necesitaría una señal que viajara más rápido que la velocidad de la luz (Hernandez,2017).

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior procederemos a detallar gráficamente la simultaneidad de dos eventos para la TER. Analizaremos un observador que se encuentra en reposo y un observador que se encuentra en movimiento (automóvil), representando por medio de un cono de luz los eventos que son simultáneos.

El primer observador A esta en reposo, dicho esto su posición espacial será igual a $x = 0$, donde los planos de simultaneidad serán representados paralelamente al observador. En la figura 2.9 el observador A tiene dos columnas al lado de él, las columnas tienen dos interruptores a la misma distancia y en el mismo sitio. Cabe aclarar que las dos columnas también nos servirán de apoyo para representar las líneas del universo del observador, que contienen los interruptores. El observador A procede a encender una linterna (secuencia 1), y después de haber pasado un tiempo, el cono de luz se intercepta con las dos columnas registrando dos eventos simultáneos (secuencia 2).

En este caso hacemos mención que las columnas son las líneas del mundo que habíamos representado en los diagramas de espacio-tiempo de Minkowski, por temas de complejidad al construir las imágenes, asociaremos las columnas que se ven representadas a los lados de observador como las líneas del mundo (líneas del universo).

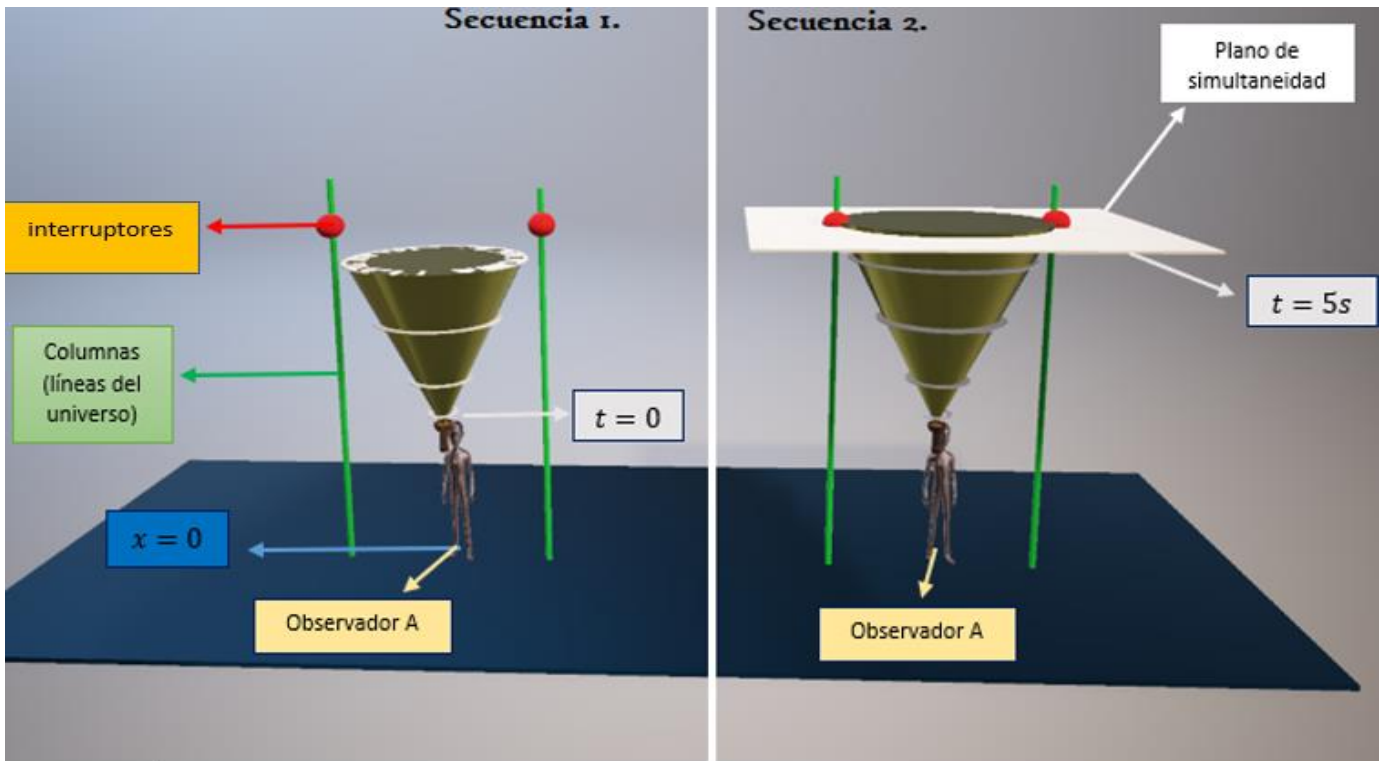


Figura 2.9: Plano de simultaneidad para un observador en reposo. Secuencia 1. Observador que prende una linterna. Secuencia 2. Observador que observa dos eventos simultáneos. Las columnas hacen el papel de las líneas del universo para un observador en reposo.

Teniendo en cuenta la imagen anterior, se puede observar que las columnas nos ilustran las líneas del universo (sinónimo columna-línea del universo) para el observador en reposo. Ahora procederemos en detallar un rayo luminoso que se encuentra en la mitad para un observador que está en movimiento en su carro y un observador que está en reposo, el observador A registrara los eventos de simultaneidad para cada observador. En la figura 2.10 el observador A detalla que uno de los interruptores (interruptor 3) del observador B se activa primero y luego se activa los dos interruptores de él (interruptor 1 y 2) al mismo tiempo (simultáneos), y por último el interruptor 4 del observador B se enciende.

A continuación, la imagen 2.10 esta representada en 3-D, mostrando la parte de adelante y la parte de atrás. La imagen se editó y se colocó de esta manera para evidenciar mejor la secuencia.

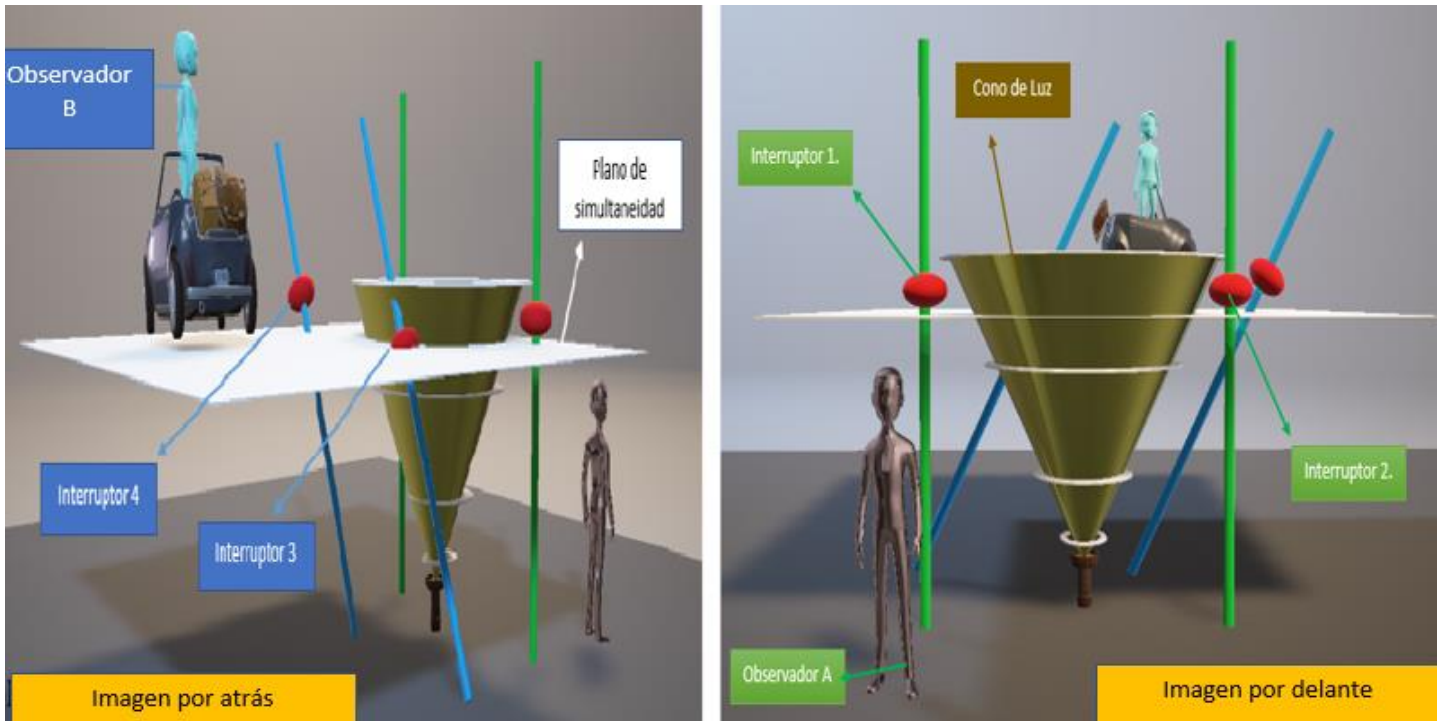


Figura 2.10: Plano de simultaneidad para un observador A y para un observador B.

De acuerdo con lo anterior, la hipótesis del observador A es decir que los tiempos de activación no son los mismos y que la velocidad del automóvil debe influir en dichos tiempos. Ahora procederemos a detallar la perspectiva del observador B. El observador B como se ilustra en la imagen está sobre un vehículo que lleva una velocidad, pero dicho observador está en reposo “sentado” respecto al vehículo procediendo a decir que su posición espacial de acuerdo con el vehículo es $x = 0$. En la figura 2.11 se ilustra que el observador B dice que se activa primero el interruptor 2 y luego se activan simultáneamente sus interruptores (3-4), y por último el interruptor 1, llegando a la misma hipótesis del observador A. pues el observador B dice que A se está alejando del automóvil, y por dicha velocidad con la que se está alejando los tiempos no son los mismos.

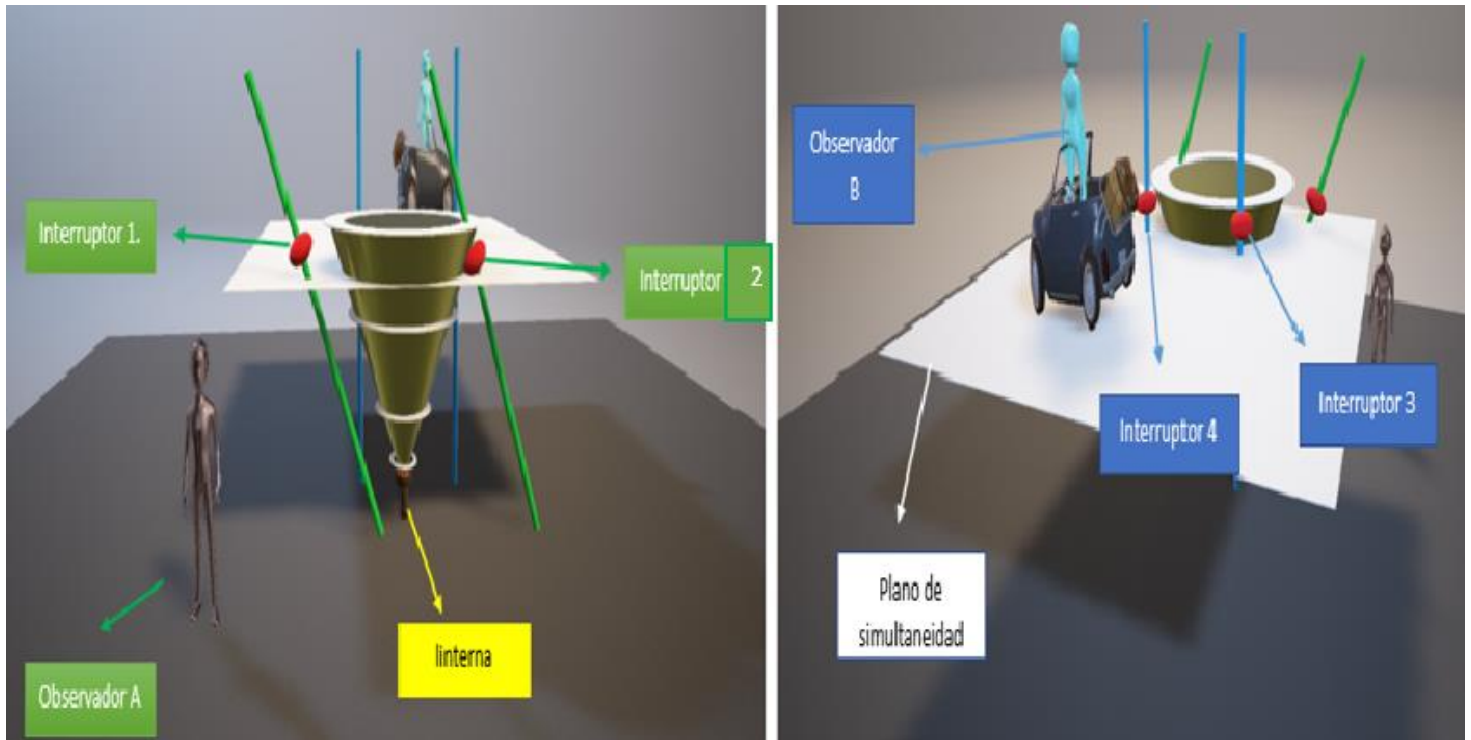


Figura 2.11 Plano de simultaneidad para dos observadores A y B.

De acuerdo con el experimento descrito anteriormente, se puede decir que lo que es simultáneo para un observador para el otro no lo es. En otras palabras, la simultaneidad de eventos separados es por consiguiente relativa y no absoluta, siguiendo el segundo postulado de la TER. Por consiguiente, el espacio y tiempo bajo la perspectiva de la teoría especial de la relatividad dejan de ser independientes para estructurar una dependencia como ya antes lo había mencionado Minkowski.

Los planos de simultaneidad a fondo nos detallan el análisis de cada marco o sistema de referencia, dando consigo mismo la explicación de la dependencia del espacio y tiempo, mediante los diagramas de Minkowski. Respecto a lo anterior, detallamos y damos cuenta que el espacio y el tiempo posee tener distintas características de donde el observador este midiendo, pues la teoría absolutista ha dejado de ser el paradigma para poder considerar nuevas teorías acerca del espacio y tiempo.

2.4 Análisis comparativo del concepto de espacio para el contexto clásico y moderno TER.

Este capítulo abordara el análisis comparativo de cada uno de los autores mencionados, para sintetizar y detallar el concepto de espacio de acuerdo con los diferentes pensamientos.

El primer aspecto para mencionar es el análisis del contexto clásico, evidenciado las distintas posturas que los autores tenían por explicar diversas ideas absolutistas o relativistas, proponiendo una serie de argumentos que dan valor respecto a sus posturas filosóficas, matemáticas y físicas. Cabe aclarar que los argumentos de los autores se basan en teorías que han establecido para fundamentar distintas disciplinas.

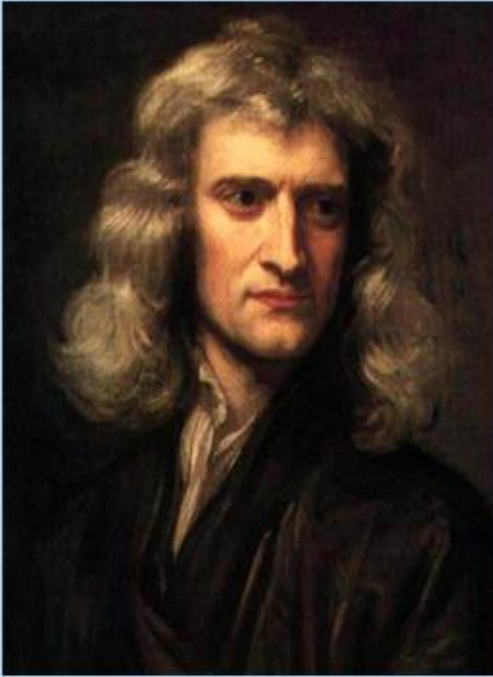
El segundo cuadro comparativo detallara el análisis moderno que surgió a través de varias hipótesis filosóficas, tratamientos matemáticos y experimentos mentales que corroboraron las nociones acerca del concepto de espacio cambiando el paradigma clásico, estableciendo una nueva visión del mundo que ha enmarcado las teorías modernas de la física.

2.5.2 Cuadros comparativos.

Autores que se destacaron en el transcurso del siglo XVII, XVIII y siglo XIX expusieron varias hipótesis relacionadas bajo una postura filosófica, conllevando a estructurar nuevas teorías físicas que enmarcaban el avance del concepto del espacio. Es importante mencionar que a través de la filosofía de la naturaleza y las matemáticas se ha venido tratando el concepto de espacio desde el carácter teórico y experimental, basándose en experimentos reales como experimentos mentales. El contexto clásico detalla por tener una fuerte corriente filosófica y creencias que adoptan a sus teorías físicas cuyas ideas se verán reflejadas en el siguiente cuadro comparativo.

<p>Ítem</p> <p>Autores</p>	Características del espacio.	Corriente filosófica
<p>Rene Descartes (1596-1650)</p> 	<p>-El espacio tiene relación con los objetos extensos, puesto que puede ser ocupado por objetos con límites de extensión.</p> <p>-Se considera que a partir de la relación que tiene los objetos con el espacio, el espacio propio no puede superponerse como lo puede hacer los objetos con dicho espacio.</p> <p>-El espacio cartesiano tiene la propiedad de no tener vacío, pues donde hay extensión hay algo que lo ocupe.</p> <p>- El espacio posee características de coordenadas y posiciones aritméticas, dicha asignación son valores que dan cuenta de los lugares.</p>	<p>Racionalismo.</p> <p>-Todo ente extenso y corpóreo tiene que estar sujeto a la experiencia, y procede únicamente de la naturaleza.</p> <p>-El espacio y el tiempo son dos entes dependientes de los objetos extensos, designando posiciones, lugares y los diferentes cambios que un objeto puede adquirir en la naturaleza.</p>
<p>Gottfried W. Leibniz (1646-1716)</p> 	<p>-El espacio es relativo y no puede ser absoluto con relación a la nada. Pues los objetos que lo ocupan están común mente relacionados con el espacio.</p> <p>-El espacio es un contenedor de posibilidades entre el orden de las cosas que existen, dando lugar y posición a los diferentes espacios en donde se sitúan los cuerpos</p> <p>-La monada es el vínculo que existe entre el espacio y el tiempo, logrando transmitir las diferentes acciones que ejerce un cuerpo con referencia a otro cuerpo.</p>	<p>Racionalismo.</p> <p>-La lógica y las matemáticas están sustentos por la pura racionalidad.</p> <p>-El concepto de espacio y tiempo están íntimamente relacionados y conectados por las sucesiones de posibilidades que los objetos pueden establecer.</p> <p>-Las monadas son la explicación de los diferentes acontecimientos que un objeto dinámico puede exponer a la naturaleza.</p>

Isaac Newton (1643-1727)



-El espacio es homogéneo, isotrópico y absoluto, e independiente de todo fenómeno natural.

-El espacio Newtoniano posee la propiedad de ser inmóvil, infinito y tridimensional.

-El espacio físico posee la característica de ser plano, resaltando que es independiente de todo objeto material situado en él.

-Los espacios relativos son aquellas asignaciones que se le otorgan a los objetos materiales, situando y dando lugar a los espacios.

-La suma de todos los espacios relativos es único espacio absoluto.

Empirista británico.

-La corriente filosófica de Newton estuvo enmarcada por una sucesión de experimentos mentales y experimentales que lo conllevó a formalizar sus hipótesis teóricas.

-El espacio y el tiempo son independientes de cualquier marco de referencia inercial.

-Cada causa trae un efecto instantáneo para cada observador, detallando que el pasado, presente y futuro son los mismos, independiente del espacio en donde este ubicado.

Immanuel Kant (1724-1804)



-El espacio es independiente de la experiencia (a priori), no depende de ninguna clase de conjunto o elemento para ser concepto.

-La noción de espacio está detallada por la geometría euclidiana, caracterizándose por ser infinito, continuo y tridimensional.

-El espacio Kantiano también posee propiedades Newtonianas: Homogéneo, isotrópico e inmóvil.

Idealismo, e idealismo trascendental.

-El espacio y el tiempo son independientes y a priori, haciéndolos excluyentes de una variedad de conjuntos o elementos.

-La intuición pura de la espacialidad procede a detallar los postulados de la geometría.

Tabla 2.1: Cuadro comparativo entre los modelos de espacio y tiempo para el contexto clásico, una síntesis de la teoría y el pensamiento filosófico.

La siguiente tabla ilustrara el concepto de espacio y tiempo moderno, haciendo énfasis sobre los nuevos conocimientos y orientaciones filosóficas que conlleva a romper el paradigma clásico. Todo esto se desarrolla a partir del siglo XIX y siglo XX.

<p>Ítem</p> <p>Autores</p>	Características del espacio.	Características del tiempo.	Corriente filosófica
<p>Ernst Mach (1838-1916)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -El espacio absoluto es un influjo y una carencia de experimentos relacionales, es decir el espacio absoluto no es posible. -El espacio es relativo y procede de la experiencia para especificar y detallar el acontecimiento de los fenómenos naturales. -ley fundamental sobre la teoría de los movimientos inerciales, todo movimiento es relacional con la determinación de la materia circundante. La noción de un espacio inmóvil no se encuentra bajo el parámetro relacional. 	<ul style="list-style-type: none"> -El tiempo es relacional y se detalla con la experiencia. - El tiempo hace parte del conjunto relacional de los objetos, -El tiempo es dependiente de los sucesos que acontecen en la experiencia. 	<p>Empirio-criticismo.</p> <ul style="list-style-type: none"> -La noción de un espacio inmóvil y absoluto no se puede detallar con experimentos mentales y bajo la creencia de una teoría metafísica.. -El espacio y el tiempo son dos entes dependientes de los objetos, pues a través de ellos se puede hacer relaciones que contribuyen a establecer su comportamiento en la naturaleza. -La ciencia distingue y tiene criterios para objetivar las experiencias interpretativas para establecer leyes universales.
<p>Hermann Minkowski (1864-1909)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -El espacio y tiempo son dependientes y pertenecientes de un universo Tetradimensional. -El espacio no posee propiedades geométricas euclídeas. -El espacio se puede modelar a través de propiedades geométricas correspondientes a una geometría de tipo hiperbólica. -La distancia entre eventos tiene un carácter absoluto para todos los observadores inerciales. Debido al valor absoluto de la velocidad de la luz. -La noción de espacio y tiempo se fundan en un solo concepto (espacio-tiempo). 	<ul style="list-style-type: none"> -El tiempo posee características espaciales, de arriba hacia abajo, de derecha a izquierda y de atrás hacia adelante. -Las líneas de tiempo de un observador son enunciadas como las líneas del universo -la relación causal de varios eventos se ve inmersa en la constancia de la velocidad de la luz. 	<p>Convencionalista.</p> <ul style="list-style-type: none"> -La inspiración matemática y su rol por las ciencias exactas conlleva a organizar y estructurar una de las geometrías no euclidianas que detallan y explican aproximadamente el concepto de espacio-tiempo para la teoría especial de la relatividad. -Minkowski muy a llegado a la filosofía de Poincaré opto por tratar de relacionar ciertas hipótesis que le parecían de una u otra forma concisa. -En el año 1908 en la conferencia "espacio y tiempo" Minkowski cita y hace mención sobre la <u>la</u> ideología de Poincaré.

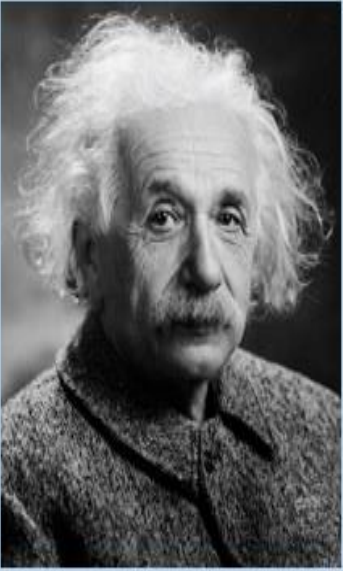
	<p>-El espacio forma parte de un intervalo temporal.</p> <p>Las leyes de la física deben cumplirse para cualquier marco inercial.</p> <p>-La constancia de la velocidad de la luz es constante para todos los marcos inerciales.</p> <p>-El espacio físico posee la característica de ser plano (llano).</p> <p>-el espacio es dependiente del tiempo de igual modo el tiempo con el espacio.</p> <p>Los cuerpos adquieren transformaciones en su longitud cuando están sometidos a una velocidad cercana de la luz.</p>	<p>-La simultaneidad no es un concepto absoluto para todos los observadores.</p> <p>-La simultaneidad dependen del marco de referencia inercial.</p> <p>-El tiempo y espacio son dependientes formando un tejido de cuatro dimensiones.</p>	<p>Empiriocriticismo.</p> <p>-La teoría de Einstein estuvo muy enmarcada por la corriente filosófica de Ernst Mach, considerado el espacio y tiempo como dos entes relativos y relacionales.</p> <p>-El espacio y el tiempo son dependientes de cualquier marco de referencia inercial.</p> <p>-De acuerdo con la teoría especial de la relatividad, el análisis surgió acerca de la electrodinámica de los cuerpos, conllevado a modelar y abrir las diferentes posibilidades para explicar el fenómeno.</p>
---	--	---	---

Tabla 2.2: Cuadro comparativo entre los modelos de espacio y tiempo para el contexto moderno, pensamiento e ideología.

Luego de haber hecho un análisis conceptual, finalmente se ha concluido con el trabajo de grado un Análisis comparativo del concepto de espacio clásico y relativista especial, haciendo un recorrido histórico y analítico bajo la perspectiva clásica y moderna (TER) como referentes teóricos fundamentales. Cabe mencionar que en primera instancia no se pudo abordar más autores importantes de la filosofía y física que contribuyeron el auge de las teorías físicas. Pero, aun así, se detallando una clara síntesis y una estructura amplia sobre el concepto de espacio. El motivo del trabajo de grado es hacer una aproximación introductoria y conveniente para el enriquecimiento disciplinar de la física. De acuerdo con lo anterior, se proponen las siguientes conclusiones.

Conclusiones:

- a. Las diferentes corrientes filosóficas y metafísicas permiten sesgar y fijar parámetros en donde se puede evidenciar el prototipo del concepto de espacio, evidenciando distintas posturas argumentativas que utilizan para estructurar las teorías acerca del concepto de espacio. En este

sentido el carácter clásico y moderno están permeados por una corriente filosófica que organiza el concepto de espacio absoluto o relativo, especificando propiedades y funciones que acontece dicho espacio.

b. El concepto de espacio clásico esta inmerso en las hipótesis, cuya reunión de nociones se perciben a través de las síntesis teóricas que reflejan el carácter dependiente o independiente de los objetos que lo rodean o que se encuentren en él.

c. El espacio Newtoniano y Kantiano obedece los postulados euclidianos estableciendo la homogeneidad y continuidad, revelando la absolutez del espacio ante cualquier argumento a posteriori, considerando que la noción de espacio se presenta de manera a priori e innata de cualquier ente observable o fenómeno natural. Dicho lo anterior y resaltando el carácter isotrópico, se refleja un espacio absoluto igual y equivalente en todas sus partes, recalcando que la acción a distancia (causa-efecto) concebida por cualquier observador es instantánea en cualquier punto del espacio, puesto que el paradigma se estableció y se desarrolló en la teoría de la mecánica clásica, conllevando a formalizar el concepto de espacio independiente y absoluto.

d. La teoría de la mecánica clásica evidencia un espacio inmóvil y contenedor de todos los movimientos absolutos y relativos, destacando el espacio en su totalidad como inmóvil y como posibilidad para observar los diferentes movimientos que acontece la naturaleza, pues dicho espacio en constante movimiento no puede diferenciar los distintos movimientos que se representan en la naturaleza, puntualizando en la necesidad de fijar un marco inercial en reposo, como punto de referencia.

e. El concepto de espacio moderno (TER) está íntimamente ligado con la ideología racionalista, detallando su carácter dependiente y relacional con los demás entes y fenómenos naturales para detallar la noción de espacio. Concebir un espacio independiente sin relación a la nada, no puede poseer propiedades de extensión para dar explicación de aquella noción.

f. La teoría especial de la relatividad establece los marcos inerciales como la medición absoluta de cualquier evento, apoyándose geoméricamente y evidenciando distintos planos de simultaneidad que puede obtener cada observador de acuerdo con su marco de referencia. Se establece que las leyes de la física son iguales para cualquier observador, y la velocidad de la luz es la constante universal para todos los marcos de referencia. Dicho lo anterior, la geometría no-Euclidiana de Minkowski evidencia el comportamiento de simultaneidad a través de los conos de

luz designando las líneas del universo para una partícula en reposo o en movimiento en donde se consta que los vértices de dicho cono es el límite de velocidad de la luz.

g. El presente trabajo de monografía se ha realizado con el objetivo de hacer una aproximación teórica al concepto de espacio, analizando sus principales características y funciones a través del papel que ha venido desempeñando en la física. Se considera que dicho documento sea un aporte teórico al programa de la licenciatura en física sirviendo como referente inicial para la construcción de nuevos trabajos que den pie a la discusión sobre las bases que componen la física teórica y experimental, innovado y proponiendo discusiones posteriores dentro del Departamento De Física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Lista de referencias:

- Álvarez Toledo Sebastián. (2008). Causalidad y tiempo: el sentido de una reducción. Teorema, XVII, 29-42.
- Blanco, Carlos. (2005). Leibniz y la teoría de la relación. Themata revista de filosofía.
- Bravo, Elia Nathan. (2012) Notas sobre el concepto de espacio absoluto: Newton y Einstein. Alianza Editorial.
- Cala, Favio Ernesto & Guerrero, German (2010). Inercia con fuentes materiales o la eliminación de los sistemas inerciales: sobre lo propuesto por Mach y lo hecho por Einstein. Universidad del Valle. Programa Editorial
- Cala, Favio. (2007). De la relatividad de la inercia al universo cerrado. Revista de la Academia Colombiana de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales.
- Cardona, Carlos & Guerrero, German. (2010). Teoría especial de la relatividad y conocimiento a priori. Universidad del Valle. Programa Editorial.
- Davies Paul. (1995). Sobre el tiempo: la revolución inacabada de Einstein. Madrid: Crítica.
- Descartes, Rene. Los Principios de la Filosofía. Traducido por Quintas, Guillermo: Alianza Editorial, 1995.
- Descartes, Rene. Meditaciones Metafísicas y otros textos. Traducido por López, E. y Graña, M. Madrid: Gredos, 1987, p. 211.
- Descartes, Rene. Meditaciones acerca de la filosofía primera, en las cuales se demuestra la existencia de Dios, así como la distinción real entre el alma y el cuerpo del hombre. Traducido por Peña, Vidal. (2011). Editorial KRK Ediciones.
- D'Inverno Ray. (1992). Introducing Einstein's Relativity. New York: Oxford University.
- De Gortari Eli. (1960). Causalidad y determinismo. Diánoia, VI, 22-43.
- French. (1974). Relatividad Especial, Curso de física del MIT (Massachusetts Institute of Technology). New York: Reverté S.A.

- Gamow George. (1971). Biografía de la física. Madrid: Alianza Editorial.
- García Morente. Manuel (1980). Lecciones preliminares de la filosofía. Editorial Porrúa. Novena Edición.
- Granés Sellares, José. (2005). Isaac Newton Obra y contexto. Una introducción. Bogotá D.C: Editorial.Ltda.
- Guerrero, German (2010). Einstein: científico y filósofo. Universidad del Valle. Programa Editorial
- Hawking.S & Ellis,G. (1973). The Large Scale Structure of Space-Time. Cambridge University: Cambridge University Press.
- Hernandez, Victor (2002). La geometría analítica de Descartes y Fermat ¿Y Apolonio?. Vol. 1. Apuntes de historia de las matemáticas.
- Jammer, M. (1982). Concepto de espacio. New York, Dover publications, INC.
- Minkowski Hermann. (1908). Space and Time: Minkowski Papers on Relativity. Moscú: Minkowski Institute Press.
- Leibniz, Gottfried. Conception of philosophical method, Zeitschrift für philosophische, Vol 20 (1966).
- Leibniz. La polémica Leibniz-Clarke. Eloy Rada(Ed y Trad). Madrid: Taurus. 198. P68.
- López posada, Yuly. (2012). Problemáticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría especial de la relatividad con respecto a los maestros en formación de la licenciatura en matemáticas y física de la universidad de Antioquia (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia.
- Pacheco C. & Pulido A. (2001), *Análisis formal de los conceptos de espacio y tiempo*, Universidad Pedagógica Nacional (tesis de Pregrado), Bogotá D.C, Colombia.
- Peña, Vidal (2017). El concepto de espacio en Descartes una revisión sintética en vistas de desbanalizar el uso del concepto de espacio, Pontificia Universidad Católica De Chile.

- Pérez, Alberto. (2017). La electrodinámica de Einstein en 1905. Departamento de Electrónica y Electromagnetismo. Universidad de Sevilla
- Quintana, Hernán (2004). Espacio, Tiempo y Universo. Tomo II, Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Rodríguez, Miguel Ángel (2012), *Estructura causal en el universo cosmológico de Godel (tesis de pregrado)*, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C, Colombia.
- Sánchez, José. (1983). Origen y desarrollo de la relatividad. Alianza Editorial.
- Sepúlveda, Alonso (2003). Los conceptos de la física. Evolución Histórica. . Medellín: Universidad de Antioquía.
- Tejeiro, Juan Manuel. (2004). Sobre la teoría especial de la relatividad. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia - Unibiblos.
- Vélez, Fabio. (2012). Apuntes de Relatividad. Bogotá D.C: Corcas Editores SAS.

Bibliografía:

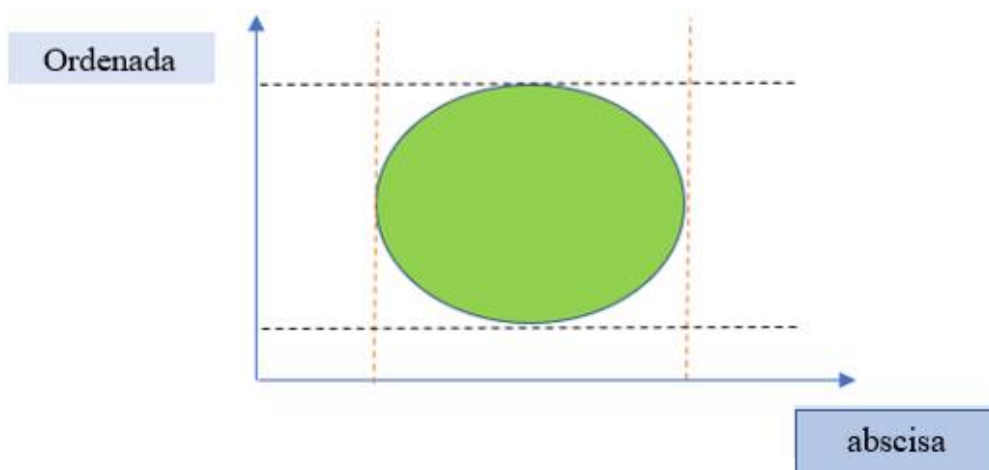
- Blanco, Carlos. (2005). Leibniz y la teoría de la relación. Themata revista de filosofía.
- Bravo, Elia Nathan. (2012) Notas sobre el concepto de espacio absoluto: Newton y Einstein. Alianza Editorial.
- Descartes, René. Meditaciones Metafísicas de la filosofía. Traducido por Quintas, Guillermo: Alianza Editorial. 1995.
- Descartes, Rene. Meditaciones Metafísicas y otros textos. Traducido por López, E. y Graña, M. Madrid: Gredos, 1987, p. 211.
- García Morente. Manuel (1980). Lecciones preliminares de la filosofía. Editorial Porrúa. Novena Edición.
- Gamow George. (1971). Biografía de la física. Madrid: Alianza Editorial.

- Guerrero, German (2010). Einstein: científico y filósofo. Universidad del Valle. Programa Editorial
- Hernandez, Victor (2002). La geometría analítica de Descartes y Fermat ¿Y Apolonio?. Vol. 1. Apuntes de historia de las matemáticas.
- Hernández, Luis esteban. (2017). Estructura causal de la solución de Kerr (tesis de pregrado). Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá D.C. Colombia.
- Janssen Bert. (2013). Teoría General de la Relatividad. Granada: Universidad de Granada - España, Departamento de física teórica y del cosmos.
- Kaufmann, W. (1977). Relatividad y Cosmología. London: Copyright.
- Leibniz, Gottfried. Conception of philosophical method, Zeitschrift für philosophische, Vol 20 (1966).
- Leibniz. La polémica Leibniz-Clarke. Eloy Rada(Ed y Trad). Madrid: Taurus. 198. P68.
- López posada, Yuly. (2012). Problemáticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría especial de la relatividad con respecto a los maestros en formación de la licenciatura en matemáticas y física de la universidad de Antioquia (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia.
- Newton, Isaac. (1983). Principios matemáticos de la filosofía natural, Madrid: Alianza Editorial.
- Rodríguez, Miguel Ángel (2012), *Estructura causal en el universo cosmológico de Godel (tesis de pregrado)*, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá D.C, Colombia.
- Tejeiro, Juan Manuel. (2005). Notas de clase: Principios de Relatividad General, Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia - Unibiblos.
- Sánchez, José. (1983). Origen y desarrollo de la relatividad. Alianza Editorial.
- Vélez, Fabio. (2012). Apuntes de Relatividad. Bogotá D.C: Corcas Editores SAS.

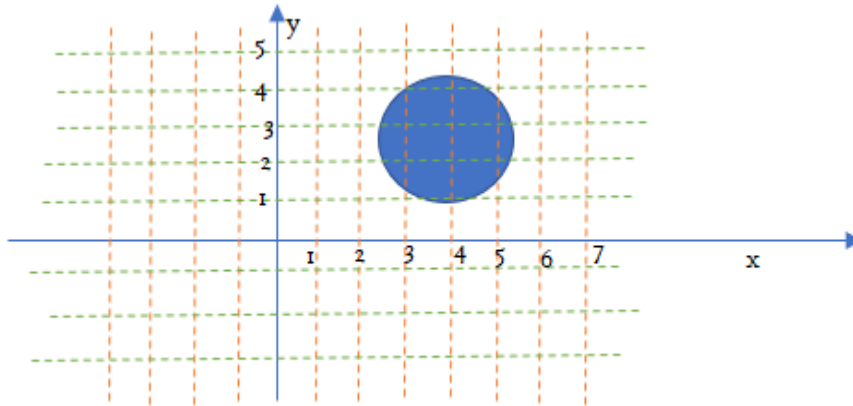
Sección de anexos:

Anexo A: Ordenadas y abscisas, sistema coordenado de la antigua Grecia.

En la antigua Grecia Apolonio no usaba el plano cartesiano que comúnmente conocemos, sino usaba un plano en donde dos líneas se cortaba entre si perpendicularmente. Conllevando a diferir que esta era la única herramienta que se usaba como sistema coordenado para darle posición y lugar a las figuras.



Haciendo uso de esta herramienta los geómetras de la antigua Grecia podían situarse y designar posiciones para representar las figuras geométricas que estaban en el espacio, designando valores o magnitudes acorde a la escala que pudieran manejar. En el año 1938 Rene Descartes para la elaboración de la geometría analítica implanto en el plano de la abscisa y ordenada valores numéricos estableciendo una posición aritmética acorde a las posiciones y lugares, estableciendo un espacio con referencia matemática.

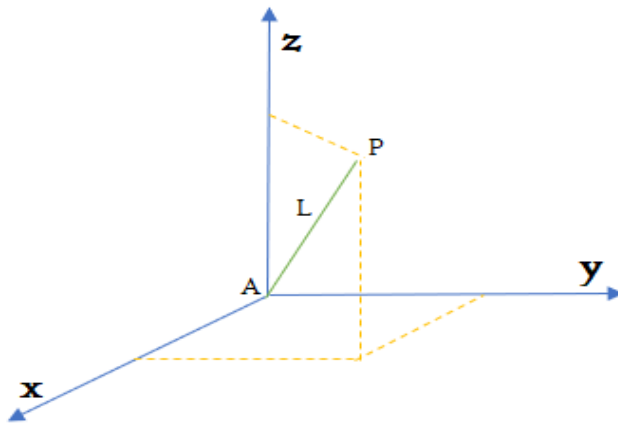


Anexo B: Demostración rotaciones y transformaciones invariancia Euclidiana.

De acuerdo con las transformaciones de Lorentz cuando $x' = 0$, $t' = 0$ y cuando $x = 0$ y $t = 0$, esto sucedía cuando dos observadores se encontraban en un mismo intervalo espacial y un mismo intervalo temporal, en resumidas cuentas, cuando sus orígenes coinciden. Es importante decir que tal situación de los relojes está sincronizada en los orígenes S y S' , y ambos marcan cero.

Después de un tiempo cuando el sistema de S' se estuviera alejando del sistema S los dos observadores se encontraban con una característica peculiar y era que cada uno tenía distintos intervalos de tiempo e intervalo espacial. Pues para la mecánica clásica, cuando dos sistemas estuvieran desplazados el uno con respecto al otro o en movimiento relativo, el tiempo era igual y universal para los dos observadores lo único que variaba era la longitud o el desplazamiento en el espacio.

La geometría de Euclides es un sistema cartesiano de coordenadas, un punto representado en dicho espacio está designado por tres números reales x , y , z representados en las tres dimensiones de Euclides.



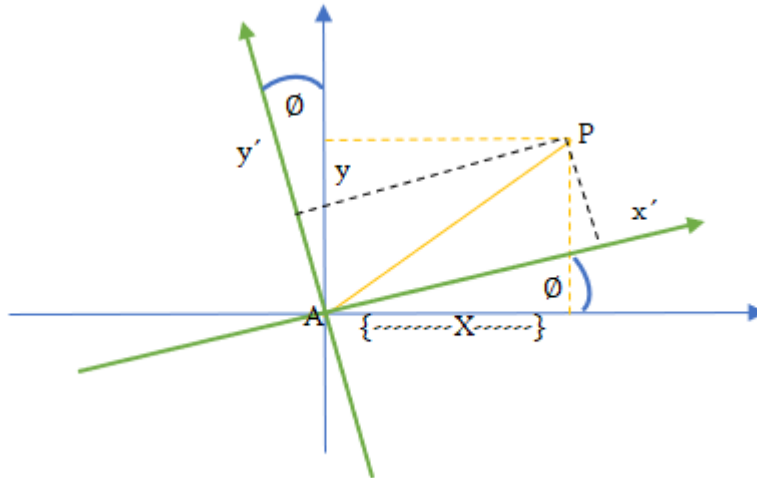
La distancia entre dos puntos (A y P) está dada por la ecuación del teorema de Pitágoras $L^2 = x^2 + y^2 + z^2$, en este sentido simplificaremos y reduciremos una dimensión quedando la ecuación $L^2 = x^2 + y^2$. Ahora si rotamos el sistema coordenado (x, y) en un ángulo \emptyset para obtener un nuevo sistema (x', y') la longitud de L no cambia, aunque si la proyecciones de AP.

$$L^2 = x'^2 + y'^2$$

Por lo tanto

$$x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2 \quad (x \neq x', y \neq y')$$

Como se conocen las componentes de (x, y), y el ángulo \emptyset , las nuevas componentes (x', y') se pueden obtener mediante las transformaciones,



$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$$

$$y' = y \cos \theta - x \sin \theta$$

A su vez estas reglas pueden obtenerse de la ecuación $x^2 + y^2 = L^2 = x'^2 + y'^2$ la que tiene como nombre de condición de invariancia de longitud. Aunque las condiciones de AP sobre los ejes coordenados son relativos al sistema coordenado, la longitud de AP es absoluto o un invariante, por consiguiente, no depende del sistema coordenado.

Anexo C: Demostración rotaciones y transformaciones Geometría de Minkowski.

Si tenemos un diagrama de Minkowski, un sistema A' que se mueve con velocidad v , se representa como un sistema ortogonal desde el sistema de referencia inercial A donde se sitúa el observador, estos dos sistemas se relaciona con la transformación de Lorentz. El ángulo θ es tal que se cumple.

$$\tanh \theta = \frac{v}{c}$$

Por propiedades de las rotaciones el $\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}$ y $\cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}$, teniendo en cuenta esto sabemos que por las relaciones trigonométricas $\tanh \theta = \frac{\sinh \theta}{\cosh \theta}$

Y, por lo tanto:

$$\tanh\theta = \frac{\frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}}{\frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}}$$

Quedando así mismo, como:

$$\tanh\theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{e^\theta + e^{-\theta}}$$

Como sabemos muy bien, y partiendo del hecho que el espacio-tiempo de Minkowski cumple que $\tanh\theta = v/c$, entonces $\sinh\theta = v$ y $\cosh\theta = c$, así mismo llegamos a una transformación de Lorentz usando los ángulos y parámetros de las identidades de Euler, la cual se ve representada dentro del plano complejo (x, ict) especificando que esto es un espacio físico (x, t) , pero con transformaciones trigonométricas hiperbólicas.

Anexo D: Clasificación del intervalo al cuadrado.

Según Vélez (2002), el intervalo espaciotemporal está compuesto por las cuatro componentes, tres espaciales y una temporal, si el intervalo de 2 eventos es igual a cero, su componente temporal definida como $(cdt)^2$ es igual a la componente espacial. El intervalo es definido como nulo o evento luminoso

$$ds^2 = 0$$

$$ds^2 = cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$ds^2 = (icdt)^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

$$(cdt)^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Si El intervalo ds^2 de dos eventos es mayor que cero, entonces la componente temporal $(cdt)^2$ es mayor que la componente espacial, y el intervalo se denomina intervalo temporal.

$$ds^2 > 0$$

$$ds^2 > (cdt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$-(cdt) > -(dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

$$(cdt) > dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Si El intervalo ds^2 de dos eventos es mayor que cero, entonces la coordenada temporal $(cdt)^2$ es menor que la componente espacial, y el intervalo se denomina intervalo espacial.

$$ds^2 < 0$$

$$ds^2 < (cdt) - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$-(cdt) < -(dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

$$(cdt) < dx^2 + dy^2 + dz^2 \text{ Ec.3}$$

