



Simulación computacional del concepto de gradiente alternante: una propuesta para el acercamiento a la física de aceleradores

Germain Nicolas Morales Suarez

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología , Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2018

Simulación computacional del concepto de gradiente alternante: una propuesta para el acercamiento a la física de aceleradores

Germain Nicolas Morales Suarez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Licenciado en Física

Director:

M.Sc. Miguel A. Morales S.
M.Sc. Mauricio Rozo Clavijo

Línea de Investigación:

Enseñanza de la física y su relación físico-matemática
Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología , Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2018

A mi madre
Amor eterno

Agradecimientos

A mi madre Olga Ines Ruge, que con su valor y su temple me a llevado a donde estoy.

A mi padre por todo su apoyo.

A mis hermanos los cuales han sido eje fundamental de mi crecimiento personal y academico.


A mis amigos y compañeros quienes compartieron el camino de la academia.

A mi pareja quien comparte mi camino y destino.

Resumen

El siguiente trabajo titulado “simulación computacional del concepto de gradiente alternante: una propuesta para el acercamiento a la física de aceleradores”, mostrará el desarrollo de una simulación computacional que logra dar cuenta del efecto del gradiente alternante usado en aceleradores circulares, para guiar, enfocar y compactar un haz de partículas en su recorrido por el acelerador, buscando generar una herramienta que logre acercar a los estudiantes de licenciatura en física y carreras afines a los conceptos básicos de la física de aceleradores, demostrando de este modo, que los conceptos sobre los cuales descansan las bases de la física de aceleradores de partículas son conjunto de conceptos físicos enseñados en las áreas de estudio de las carreras de licenciatura en física y carreras afines. Con el fin de lograr el objetivo de este proyecto se realizó un estudio sobre los modelos físicos y matemáticos que sostiene el concepto de gradiente alternante y se realizó un análisis sobre las teorías de modelación y simulación.


Palabras clave: Gradiente alternante, aceleradores, modelación, simulaciones, cuadrupolos, python.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 4	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Simulación computacional del concepto de gradiente alternante: una propuesta para el acercamiento a la física de aceleradores.
Autor(es)	Morales Suarez, Germain Nicolás
Director	Morales Suarez, Miguel Angel Rozo Clavijo, Mauricio
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2018
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	GRADIENTE ALTERNANTE, ACELERADORES, MODELACIÓN, SIMULACIONES, PYTHON.

2. Descripción
<p>El presente trabajo tiene como objetivo la elaboración de una simulación computacional que logre acercar a los estudiantes y docentes de la carrera de licenciatura en física y carreras a fin a los conceptos básicos de la física de aceleradores, por este motivo se ha tomado como sistema de estudio el efecto del gradiente alternante dentro de un acelerador de partículas circular, guiados bajo una investigación de tipo experimental descriptiva, se pretende crear un modelo (descripción) que permita mostrar sus propiedades y manifestaciones del fenómeno del gradiente alternante, para lo correcta elaboración de esta descripción se realiza un estudio detallado de la ecuación de movimiento de las partículas cargadas en interacción campos magnéticos y eléctricos en la línea de transporte de un acelerador de partículas, este modelo desarrollado descansa sobre las teorías de simulación y modelación descritas en el documento, este proyecto se enmarca en los supuesto de la línea de investigación Enseñanza de la Física y su relación Físico-matemática</p>

3. Fuentes
<p>F. Díaz. Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo. Revista Electrónica de Investigación Educativa, 5(2), 2003.</p> <p>F. Díaz and G. Hernández. Estrategias docentes para un aprendizaje significativo. Una interpretación constructivista (2a. ed.). México: McGraw Hill., 2002.</p> <p>J. Dewey. Experience Education. Nueva York: Simon Schuster, 1938/1997.</p> <p>G. Amaya. La simulación computarizada como instrumento del método en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la física, desde la cognición situada: Ley de ohm. Revista Actualidades Educativas en Educación, 8(1):1{31, 2008.</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 4	

K. Wille. The Physics of Particle Accelerators. Oxford University Press, 2000.

S. Y. Lee. Accelerator Physics. World scientific edition, 1999.

O. J. Camargo. Una propuesta didáctica mediada por las tic para la enseñanza de los conceptos básicos en física de aceleradores aplicados en el Lhc, Universidad Pedagógica Nacional, 2017.

R. Macek. Report of the working group on electron-cloud effects. ICFA Beam Dynamic Mini-Workshop on Beam Induced Pressure Rise at BNL, 2000.

F. Hinterberge. Electrostatic accelerators. Helmholtz-Institut für Strahlen-und Kernphysik, 2000.

M. S. Livingston and J. P. Blewett. Particle Accelerator. Macgraw hill edition, 1962.

D.A. Edwards and M.J. Syphers. An introduction to the physics of High energy Accelerators. Wiley, N.Y., 1993.

U. Amaldi. The importance of particle accelerators. In Proceedings of 7th European Particle Accelerator Conference, 2000.

P. Chen. Quantum aspects in beam physics-where is the h. ICFA Beam Dynamics Newsletter, (12).

S. Humphries. Principles of Charged Particle Accelerator. Department of Electrical and Computer Engineering, 1986.

H. Wiedermann. Particle Accelerator Physics. Third edition, 2007.


F. Sannibale. Fundamentals Accelerator physics and technology. simulations and Measurement Lab, university of new mexico, June 16-17 1996.

R.E. Shannon. Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación. Trillas, México, 1988.

Banks J., Carson J.S., and Nelson B.L. Discrete-Event System Simulation. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

E.E. Tarifa. Teorema de modelos y simulación. Facultad de Ingeniería, Universidad de Jujuy, 2001. F. L. Van Rossum, G. and Drake Jr. Tutorial python, 2008.

4. Contenidos

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 4	

Con respecto al diseño de la estructura de la monografía, es pertinente aclarar que se encuentra dividida en cuatro capítulos, por un lado, el capítulo uno describe la problemática que da origen a la creación de este proyecto, su justificación y cuáles son los objetivos que se pretenden cumplir, seguido del segundo capítulo que corresponde a un pequeño apartado llamado contexto pedagógico, el cual especifica de manera concreta, las potencialidades que tiene la simulación computacional como una estrategia para el proceso de enseñanza experimental de las ciencias desde el contexto del aprendizaje situado.

Continuando con el desarrollo de la monografía, el tercer capítulo comienza con un recuento histórico del origen de los aceleradores, sus componentes y todas sus aplicaciones en la actualidad, seguido del desarrollo del modelo teórico que describe el movimiento transversal de una partícula simple en presencia de campos magnéticos externos. La deducción de la ecuación de movimiento, como su solución, se analiza desde dos descripciones validas, por un lado, el análisis óptico de la línea transporte, y por el otro lado, el análisis dinámico que utiliza la aplicación de las ecuaciones de Maxwell para campos estáticos y la ecuación de la fuerza de Lorentz.


Después, en el cuarto capítulo, se definen los conceptos de modelo, simulación, isomorfo y simulación computacional considerados como los referentes teóricos a la hora de abordar las teorías de simulación. Con base a todo el trabajo desarrollado con anterioridad, se logra hacer uso de una estructura lógica que permite la construcción de un modelo de simulación apropiado para la puesta en marcha de este proyecto. Por último, el quinto capítulo presenta un análisis sobre el desarrollo y los resultados obtenidos en el proceso de construcción de la simulación computacional, junto con las conclusiones de este proyecto.

5. Metodología

Este proyecto se desarrolla alrededor de una investigación de carácter descriptivo experimental, debido a que se plantea como objetivo la creación de una simulación computacional del efecto gradiente alternante en un acelerador de partículas circular con el fin de acercar a los estudiantes de física en los niveles de pregrado a los conceptos básicos de la física de aceleradores, por este motivo se decide elaborar un modelo acorde a los objetos reales utilizados en la física de aceleradores, tomando en cuenta las características físicas de estos elementos y sus modelaciones matemáticas con el fin de lograr definir cómo se comporta el fenómeno del gradiente alternante dentro del acelerador de partículas y lograr demostrar sus aplicaciones en los niveles de pregrado de la licenciatura en física, con el fin de lograr este objetivo, se ejecutara un montaje experimental virtual donde se establecerán condiciones iniciales modificables para cada ejecución de la simulación y de este modo lograr visualizar las propiedades y efectos deseados.

6. Conclusiones

Según los resultados encontrados en la deducción de la ecuación de movimiento transversal del haz se concluyó que los fundamentos teóricos que permiten su planteamiento y desarrollo

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

corresponde con aquellos conceptos abordados en los cursos de física mecánica, electromagnetismo, relatividad y óptica geometría pertenecientes al plan de estudios de la licenciatura en física. Se recomiendan abordar más conceptos fundamentales de la física de aceleradores, por ejemplo, el movimiento longitudinal del haz con el fin de seguir evaluando el uso de los cursos de la licenciatura para la deducción de los conceptos de este tópico moderno de la física.

Se determinó que el uso de sistemas computaciones digitales para la creación de simulaciones, puede llegar a convertirse en una potente herramienta a la hora de abordar situaciones experimentales en las áreas de física y carreras afines, siempre y cuando el desarrollo del modelo usado en la simulación cumpla con los requisitos que exige la situación experimental, es decir que de llegar a lograr desarrollar con éxito este modelo, esta herramienta computacional lograra llevar a las aulas de clases situaciones experimentales no sensibles, ni perceptibles a los estudiantes, permitiendo generar un aprendizaje situado logrando de esta manera incentivar la investigación y desarrollo de nuevas herramientas científicas.

Este acercamiento inicial al concepto de gradiente alternante abre la posibilidad de diseñar nuevos ambientes virtuales para el proceso de enseñanza -aprendizaje de la física de aceleradores. De lograr configurar estos espacios, la simulación computacional de este trabajo monográfico lograra optimizar el aprendizaje situado con la ayuda de otros recursos didácticos tales como las analogías, animaciones, los objetos virtuales de aprendizaje, entre otros.

Por último, resaltamos que el uso de una simulación computacional puede ser una herramienta tangible que permita acercar a los estudiantes de licenciatura en física o afines al concepto de gradiente alternante, esto debido a los beneficios que brinda los entornos gráficos y la manipulación de parámetros para la visualización de los efectos producidos por un arreglo de cuádrupolos magnéticos para mantener estable un haz durante el comisionamiento de un acelerador. Así mismo, los resultados obtenidos en los diagramas de fase para cada uno de los elementos magnéticos corresponde con aquellos diagramas que predice la teoría y permiten comprender a su vez el concepto de emitancia en física de aceleradores

Elaborado por:	Morales Suarez, Germain Nicolás
Revisado por:	Rozo Clavijo, Mauricio

Fecha de elaboración del Resumen:	06	11	2018
--	----	----	------

Contenido

Agradecimientos	7
Resumen	9
1 Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Justificación	5
2 Contexto pedagógico	8
3 Sobre los aspectos teóricos de los aceleradores	10
3.1 Introducción a la física de aceleradores.	10
3.1.1 líneas de investigación en física de aceleradores	11
3.1.2 Orígenes de aceleradores	12
3.1.3 Tipos de aceleradores de partículas	14
3.1.4 Aplicaciones de los aceleradores	16
3.2 Dinámica de partículas en campos electromagnéticos	18
3.2.1 Campos electromagnéticos y cargas en movimiento	19
3.2.2 Ecuaciones de Maxwell y campos magnéticos multipolares	20
3.2.3 Multipolos magnéticos y línea de transporte	21
3.2.4 Análisis dinámico: Ecuación de movimiento	23
3.2.5 Análisis óptico: Matrices de transferencia.	25
3.2.6 Concepto de emitancia en la dinámica transversal del haz.	27
4 Aspectos teóricos de las simulaciones	29
4.1 Sobre el modelo	29
4.2 Sobre la simulación	31
4.3 La simulación computacional	33
4.4 Sobre el lenguaje de programación	34

5 Simulación computacional del concepto de gradiente alternante	36
5.1 Formulación del problema	36
5.2 Definición del sistema	36
5.2.1 Formulación del modelo	37
5.2.2 Preparación de datos	40
5.3 Traslación del modelo	40
5.3.1 Validación	42
5.4 Planeación estratégica y táctica	42
5.4.1 Experimentación	43
5.4.2 Interpretación	45
6 Conclusiones	46
6.1 Conclusiones	46
Bibliografía	48

Lista de Figuras

3-1. tomado de http://www.e-sanitas.edu.co/Cursos/radio	13
3-2. Acelerador electrostático simple	13
3-3. Representación de las estructuras de aceleración y focalización de un acelerador circular.	19
3-4. Representación esquemática de los campos para diferentes elementos magnéticos que componen la línea de transporte del acelerador.	22
3-5. Electroimanes reales utilizados en la línea de transporte de un acelerador circular.	22
3-6. Sistema de coordenadas naturales curvilíneo para el análisis de la trayectoria de una partícula en un acelerador circular.	23
3-7. Representación de una partícula atravesando elementos magnéticos simbolizados como lentes ópticas	25
3-8. Representación esquemática de los dos variables que componen la el análisis en una fodecelda	26
3-9. Representación esquemática de los cambios producidos en las trayectoria de una partícula al atravesar los diferentes elementos magnéticos que componen la fodecelda	26
3-10. Representación esquemática del espacio de fases	27
3-11. Cada gráfica de un espacio de fase es para una ubicación específica en el acelerador, ya que las posiciones de las partículas y los momentos evolucionan a medida que se propaga en la línea de transporte.	27
3-12. Representación esquemática de los cambios producidos en las trayectoria de una partícula al atravesar los diferentes elementos magnéticos que componen la fodecelda	28
4-1. Algoritmo.	32
4-2. Elementos de simulación.	33
5-1. Diagrama de campo para diferentes elementos magnéticos que componen la línea de transporte del acelerador.	37
5-2. Podemos observar dos objetos, que intentan asemejar a los imanes mostrados en la figura 3-5	38

5-3. Podemos observar otro tipo de figuras creadas a partir de funciones de extrusión de las funciones del módulo VPython orientado a objetos.	38
5-4. Fuerzas que experimentan partículas que ingresan en diferentes puntos del cuadrupolo, la fuerza aumenta conforme las partículas se alejan del centro del imán.	39
5-5. Diseño de un cuadrupolo magnético normal y rotado en una FODO celda.	39
5-6. Diseño de un conjunto de partículas.	40
5-7. Modelo final de una FODO celda.	40
5-8. Modelo de una secuencia de fotogramas	41
5-9. Imagen final de la interfaz gráfica de la simulación	41
5-10. simulación de las fuerzas que experimentan partículas cargadas en diferentes posiciones en el interior de un cuadrupolo normal y rotado.	42
5-11. Arreglo de cuadrupolos normales y rotados.	42
5-12. Configuración de los pasos 1 y 2.	43
5-13. Configuración de los arreglos de (MQF) y (MQD)	43
5-14. diferentes momentos de la ejecución de la simulación.	44
5-15. Espacios de fase (x, x') , (y, y') del haz al atravesar los diferentes elementos magnéticos simulados.	45

1 Introducción

Los aceleradores de partículas tienen sus inicios a mediados de 1930 con el objetivo de contribuir a la investigación de la estructura interna de la materia y sus niveles subatómicos, convertido hoy en día como una potente herramienta de investigación en diferentes áreas como lo son: física de altas energías, la física médica, física de radiaciones, física de materiales entre otras. Dentro de este grupo de investigación se resalta el trabajo de los físicos de partículas, quienes buscan con ayuda de los aceleradores obtener energías, temperaturas y partículas que no se han dado desde el origen del universo, con la intención de revelar los secretos de la materia que aún siguen sin descubrirse, por ejemplo, los conceptos materia y energía oscura.

Un acelerador de partículas es un instrumento científico que produce y acelera haces de partículas cargadas, usualmente electrones o protones con el fin de alcanzar energías del orden de los TeV¹ por parte del haz hasta alcanzar velocidades cercanas a la luz, para luego hacerlos colisionar en punto determinado. Sin embargo, los experimentos llevados a cabo en los aceleradores no solo permiten desentrañar los orígenes y secretos del universo, también durante los últimos años, se ha logrado aplicar en diferentes campos como la medicina, la seguridad portuaria, la seguridad nacional, la computación y el arte entre otros, con resultados que han sido de beneficio no solo para la investigación, sino también para el desarrollo de las civilizaciones.

Cabe resaltar, por otra parte, que aún con las aplicaciones de los aceleradores de partículas y su gran importancia en el desarrollo de la ciencia, su enseñanza aún no hace parte del plan de estudios en las carreras de licenciatura en física en los niveles de pregrado, sin embargo, la construcción de los conceptos fundamentales de la física de aceleradores son descritos en términos de los fundamentos teóricos de la mecánica clásica, el electromagnetismo y la relatividad especial, los cuales permiten una descripción elaborada de los fenómenos físicos presentes en un acelerador. Por consiguiente, este trabajo plantea como objetivo diseñar una propuesta encaminada a la creación de una herramienta tangible que permita un acercamiento al concepto de gradiente alternante en los niveles de pregrado y asimismo, incentivar el desarrollo de nuevos ambientes de aprendizaje que favorezcan la divulgación de este tópico de la física en la carrera de la licenciatura en física.

¹Un electronvoltio (eV) es la variación de energía cinética que experimenta un electrón al moverse de un punto de potencial V_a hasta un punto de potencial V_b

De acuerdo a lo anterior, se propone presentar en el siguiente trabajo el desarrollo de una simulación computacional del efecto del gradiente alternante usado en aceleradores circulares para describir el proceso en la línea de transporte en un acelerador. Así las cosas, se busca que la simulación sea una herramienta capaz de acercar a los estudiantes de licenciatura en física y carreras afines a los conceptos fundamentales de la física de aceleradores por medio del conocimiento adquirido en las áreas de estudio de las carreras ya mencionadas. Con el fin de lograr el objetivo de este proyecto, se plantea un estudio de los modelos físicos y matemáticos que describen el concepto de gradiente alternante, al igual que un análisis de las teorías de modelación y simulación en ciencias.

Con respecto al diseño de la estructura de la monografía, es pertinente aclarar que se encuentra dividida en cuatro capítulos, por un lado, el capítulo uno describe la problemática que da origen a la creación de este proyecto, su justificación y cuales son los objetivos que se pretenden cumplir, seguido del segundo capítulo que corresponde a un pequeño apartado llamado contexto pedagógico, el cual especifica de manera concreta, las potencialidades que tiene la simulación computacional como una estrategia para el proceso de enseñanza experimental de las ciencias desde el contexto del aprendizaje situado.

Continuando con el desarrollo de la monografía, el tercer capítulo comienza con un recuento histórico del origen de los aceleradores, sus componentes y todas sus aplicaciones en la actualidad, seguido del desarrollo del modelo teórico que describe el movimiento transversal de una partícula simple en presencia de campos magnéticos externos. La deducción de la ecuación de movimiento, como su solución, se analizan desde dos descripciones validas, por un lado, el análisis óptico de la línea transporte, y por el otro lado, el análisis dinámico que utiliza la aplicación de las ecuaciones de Maxwell para campos estáticos y la ecuación de la fuerza de Lorentz.

Después, en el cuarto capítulo, se define los conceptos de modelo, simulación, isomorfo y simulación computacional considerados como los referentes teóricos a la hora de abordar las teorías de simulación. Con base a todo el trabajo desarrollado con anterioridad, se logra hacer uso de una estructura lógica que permite la construcción de un modelo de simulación apropiado para la puesta en marcha de este proyecto. Por último, el quinto capítulo presenta un análisis sobre el desarrollo y los resultados obtenidos en el proceso de construcción de la simulación computacional, junto con las conclusiones de este proyecto.

1.1. Planteamiento del problema

La física de aceleradores ha brindado aportes valiosos para el avance de diferentes tecnologías y tópicos de la física en las últimas décadas, ganando día a día mayor aceptación. Es por ello que, conviene destacar sus aportes a la creación de nuevos materiales superconductores, lo cual ha permitido el desarrollo de tecnologías más eficientes y amigables con el medio

ambiente, de igual forma, en el sector de la salud, han permitido que millones de pacientes con tumores y células cancerígenas reciban tratamientos por medio de la aplicación de técnicas de resonancia, logrando aliviar satisfactoriamente sus enfermedades, disminuyendo los posibles daños colaterales.

sin embargo, los aceleradores de partículas presentan un rango más amplio de aplicaciones, por ejemplo, son empleados para temas de seguridad portuaria, verificación de arte y objetos arqueológicos. En definitiva, estas aplicaciones muestran su relevancia e importancia en el siglo XXI, sin embargo, las carreras de licenciatura en ciencias y específicamente la licenciatura en física, no evidencian en su plan de estudios espacios académicos que fomenten y promuevan la enseñanza de la física de aceleradores, de hecho, tampoco se muestra la aplicación directa de los conceptos de la física de aceleradores con conceptos propios de la física electromagnética, la relatividad especial y la mecánica clásica.

Teniendo en cuenta que en estas áreas de conocimiento se encuentran sustentados los principios que permiten la descripción de los fundamentos de la física de aceleradores, surgen varias interrogantes, por ejemplo, ¿Por qué no existen espacios académicos que promuevan la investigación y enseñanza de la física de aceleradores?, ¿La enseñanza de la física de aceleradores corresponde a estudios pos-graduales? y ¿Pueden existir métodos o estrategias que faciliten el acercamiento a la enseñanza de conceptos de la física de aceleradores? Considerando el gran impacto de las investigaciones de la física de aceleradores y sus aplicaciones, se hace pertinente resolver la siguiente pregunta ¿Pueden generarse instrumentos que permitan un acercamiento a la interpretación de los conceptos fundamentales de la física de aceleradores en los niveles de pregrado para las carreras de licenciatura en física?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Crear una simulación computacional para visualizar el efecto del gradiente alternante en la línea de transporte de un acelerador como propuesta para el acercamiento a la física de aceleradores.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar los elementos conceptuales del gradiente alternante en física de aceleradores.
- Interpretar en detalle la ecuación de movimiento transversal de una partícula cargada en un acelerador circular.
- Definir la estructura lógica del modelo computacional para la línea de transporte en un acelerador circular.
- Diseñar la simulación en el entorno de programación python para el gradiente alternante.

1.3. Justificación

Los aceleradores de partículas desde su creación, desarrollo y funcionamiento han sido catalogados como uno de los principales logros de la humanidad en el ámbito científico y sobre todo un gran éxito colectivo para todos aquellos países involucrados en su comisionamiento, logrando así trascender sus investigaciones a diferentes planos de la sociedad, que van desde la creación de instrumentos como el láser, la televisión, el microscopio electrónico, el microprocesador, hasta la creación de aquellas técnicas enfocadas en solucionar problemas propios de una sociedad, como la seguridad portuaria, la creación de superconductores, resonadores magnéticos y radioterapias entre la más importantes, consiguiendo posicionar a los aceleradores de partículas como una fuente de desarrollo científico y tecnológico en la sociedad.

En ese sentido, los docentes de física como formadores de futuros físicos, ingenieros y científicos del país deben estar a la vanguardia del desarrollo científico de la sociedad, y asumir un rol activo en el proceso de enseñanza aprendizaje de los conceptos de la física contemporánea, con el objetivo de llevar al aula de clase, con ayuda de diferentes instrumentos los principios fundamentales de estas teorías. De acuerdo a lo anterior, la investigación se realiza con el propósito de diseñar un instrumento que permita acercar al estudiante de cursos de física electromagnética de licenciaturas en física o cualquier profesional en física al concepto de

gradiente alternante de la física de aceleradores.

Con miras a cumplir el objetivo de este trabajo, se pretende diseñar una herramienta computacional basada en el lenguaje de programación Python², con la cual se pretende visualizar la interacción entre campos magnéticos y cargas en movimiento durante la línea de transporte de un acelerador. En concreto, la simulación será un espacio controlado que tendrá características favorables para la manipulación, orientación a objetos y un entorno gráfico con ayuda del entorno de simulación Vpython³. La herramienta computacional permitiría mostrar la aplicación de los referentes teóricos que emplea la física de aceleradores para describir el enfocamiento fuerte, es decir, las ecuaciones de movimiento en términos de las ecuaciones de Maxwell para campos estáticos y la fuerza de Lorentz. Finalmente, todos los conceptos mencionados anteriormente son abordados en los cursos de mecánica y electromagnetismo en la formación de pregrado, lo cual, hace pensar que la enseñanza de la física de aceleradores no se debe restringir o delimitar exclusivamente a las áreas pos-graduales, sino por el contrario, con la ayuda de este tipo de simulaciones se pueda abordar la enseñanza de la física de aceleradores en las carreras de licenciatura en física.

²Python es un lenguaje de programación que cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. El intérprete de Python puede extenderse a funcionalidades y tipos de datos implementados en C o C++.

³Herramienta que permite la creación de simulaciones y animaciones basadas en el lenguaje de programación Python

2 Contexto pedagógico

Para comenzar, es importante aclarar que este proyecto se encuentra dirigido principalmente a carreras universitarias de licenciatura en física y a fines. Ahora bien, dentro de este contexto, se busca desarrollar una herramienta que permita el acercamiento al concepto de gradiente alternante en la física de aceleradores, ya que algunas teorías cognitivas postulan su uso como un elemento fundamental al interior de cualquier proceso de enseñanza-aprendizaje.

Es importante que el conocimiento adquirido en asignaturas como el electromagnetismo, la relatividad, la mecánica clásica, entre otras, logre ser un conocimiento situado como lo indica Díaz, F. (2003) *“el conocimiento es situado, es parte y producto de la actividad, el contexto y la cultura en que se desarrolla y utiliza”*[1], conviene advertir que la autora señala que el conocimiento no puede restringirse a las actividades educativas que *“enseñan aprendizajes declarativos abstractos y descontextualizados, conocimientos inertes, poco útiles y escasamente motivantes, de relevancia social limitada”*(Díaz, F Hernández, G. 2002)[2].

Una vez hecha esta precisión, se reconoce que en muchos casos el conocimiento transmitido en las aulas no es falta de contexto, sino por el contrario, son las actividades y las formas de presentar dicho conocimiento las que provocan un desinterés y una negación a la búsqueda permanente de aplicaciones en la sociedad, relaciones con el entorno y aspectos innovadores que pueden ser abordados en función de los conceptos trabajados en el aula de clase.

Por otra parte, es importante que en los procesos de enseñanza se logre dar espacio al sentido y aplicabilidad de cada uno de los contenidos de clase, ya que es relevante que los educandos reconozcan e interpreten las realidades de los elementos que subyacen de los conocimientos adquiridos y, de esta manera poder transferir, generalizar y trascender lo aprendido. Para Dewey, J. (1938) *“toda auténtica educación se efectuara mediante la experiencia”*[3].

Sin embargo, no siempre es posible lograr desarrollar una experiencia sensible en el aula, por ejemplo, los aceleradores de partículas son un caso particular de este tipo de experimentos, no obstante, para este tipo de experiencias la cognición situada a propuesto un serie de estrategias de enseñanza para lograr una experiencia sensible, entre ellas, los **ejercicios, demostraciones, simulaciones situadas y solución de problemas auténticos**, *“éstos consisten en la presentación de situaciones reales o simulaciones auténticas vinculadas a la aplicación o ejercicio de un ámbito de conocimiento o ejercicio profesional (dado el caso de la educación superior), en las cuales el alumno debe analizar la situación y elegir o construir una o varias alternativas viables de solución.”*(Díaz Barriga, F, 2003).

Dentro de este contexto, resulta pues, que la simulación computacional es la estrategia más pertinente para llevar una experiencia sensible acerca de los aceleradores de partículas en las aulas universitarias, considerando que la simulación es la experimentación recurrente con un modelo creado a partir de la realidad. Cabe señalar, como lo menciona Amaya, G (2009) que *“Las simulaciones computarizadas deben ser vistas como recursos técnicos de orden material, que le facilitan al educando la interacción, estudio, y/o modelación de la realidad o de una parte de ésta”*[4].

Así las cosas, se evidencia que la simulación juega un papel importante como estrategia metodológica dentro del ambiente de la cognición situada, logrando dar al conocimiento un significado en relación con las aplicaciones reales, involucrando al educando o al profesional con las áreas de investigación de vanguardia, este tipo simulaciones permite realizar diferentes experimentos y análisis, abriendo la posibilidad de que el estudiante logre generar un conocimiento significativo y funcional.

3 Sobre los aspectos teóricos de los aceleradores

Los fundamentos teóricos estudiados en este proyecto se encuentran divididos en dos secciones: la primera corresponde a un recuento histórico del origen de los aceleradores, sus componentes y todas sus aplicaciones en la actualidad y, la segunda parte corresponde con la descripción del movimiento de un haz de partículas cargadas en un acelerador circular, tanto su ecuación, como su solución analítica son descritas.

3.1. Introducción a la física de aceleradores.

Desde su creación alrededor del año 1930, los aceleradores de partículas han logrado convertirse en una poderosa herramienta para la investigación en diferentes tópicos de la física, como es sabido, desde su descubrimiento, los aceleradores han tenido el objetivo de contribuir a la investigación sobre la estructura de la materia y con el tiempo se convirtió en una herramienta de investigación en diferentes áreas como lo son: la física de altas energías, la física médica, física de radiaciones, física de materiales entre otras. Finalmente, las investigaciones continúan y en la actualidad se proyecta el diseño de nuevos prototipos de aceleradores que aporten nuevos experimentos para la comprensión de la naturaleza[5].

Un acelerador de partículas es un instrumento científico que produce¹ y acelera haces de partículas cargadas, usualmente electrones o protones, con energías del orden de los TeV ² por parte del haz, logrando durante su recorrido en tubos de ultra vacío velocidades cercanas a la luz, con el fin de hacerlos colisionar unas zonas de acción determinadas[6]. La creación de los primeros aceleradores se dio a mediados de 1932, con el objetivo de contribuir a la investigación sobre la estructura interna de la materia y sus niveles subatómicos, convertido hoy en día como una potente herramienta de investigación en diferentes áreas, como lo son:

¹El termino producir hace referencia al proceso físico que realizan unos dispositivos llamados fuentes de iones (Ion source) para producir haces de iones (positivos o negativos) utilizados en los diferentes experimentos del acelerador.

²En física de aceleradores, la unidad de medida de la energía cinética del centroide del haz son los electrón-voltios (eV). Un electrón-voltio es la energía ganada por una partícula de carga unitaria que se acelera en un potencial de 1V ($1,6 \times 10^{-19} J$)

la física de altas energías, la física médica, la física de radiaciones, la física de materiales entre otras áreas de investigación.

3.1.1. líneas de investigación en física de aceleradores

El comisionamiento³ de un acelerador contempla seis grandes líneas de investigación, cada una de ellas encargada de operar y comisionar un proceso físico en particular, de ahí la importancia de clasificar los tópicos de estudio en: fuente de iones, cámaras de vacío (o tubos), línea de transporte (imanes), estructuras de aceleración (cavidades RF), sistemas de enfriamiento, sistemas de inyección/extracción y control del haz. A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de estos tópicos.

- **Fuente de iones:** es la línea encargada de producir y controlar el haz de partículas utilizado para iniciar el proceso de aceleración. Las principales técnicas para la producción de partículas cargadas dependen del tipo de partícula, por ejemplo, para el caso de electrones, se utiliza la emisión termo-iónica, o emisión de campo; y para el caso de los protones, gases atómicos bombardeados con electrones y bombardeo de superficies atómicas con proyectiles [7, sección 3.1].
- **Cámaras de vacío:** después de obtener el haz de partículas cargado, el proceso de aceleración requiere una línea de estudio encargada de elaborar tubos de vacío, los cuales permiten la conducción del haz por un camino previamente diseñado, ya sea circular o en línea recta. Los tubos de vacío demandan de una óptima calibración, ya que en el interior se deben mantener un rango de presiones bajas, con el fin de minimizar la dispersión de las partículas del haz durante trayectorias largas, evitando colisiones entre ellas; otro aspecto importante es evitar la carga de calor por conducción producida por la nube de electrones [8].
- **Línea de transporte:** la siguiente etapa en el comisionamiento de un acelerador es la línea de transporte, una configuración de imanes superconductores (dipolos y cuádruplos) que guían, focalizan y compactan un haz de partículas cargadas altamente energéticas alrededor de una trayectoria ideal, con el fin de conducir el haz hacia los puntos donde se producen las colisiones o experimentos del acelerador. Una de las principales tareas de esta sección es controlar la luminosidad⁴ del haz, de ahí la importancia de la buena calibración y precisión del sistema magnético del acelerador.
- **Estructuras de aceleración:** otro de los aspectos primordiales a tener en cuenta es

³En física de aceleradores, el termino comisionamiento hace referencia a todo el proceso durante la planificación, diseño, selección de la instrumentación, calibración y experimentación de un haz partículas cargadas en un acelerador.

⁴Una medida de la cantidad de colisiones por segundo y por unidad de sección transversal.

la etapa de aceleración, el objetivo es lograr incrementar la energía cinética del haz, hasta alcanzar rangos de velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Para lograrlo, en primer lugar, se hace necesario contar dentro del comisionamiento con una línea de aceleración; es decir, requiere de un sistema de cavidades que empleen campos eléctricos, ya sea variables o constantes, que permitan suministrar progresivamente una cantidad determinada de energía⁵.

- **Sistemas de enfriamiento:** durante el proceso de aceleración, tanto los imanes de la línea de transporte, como las cavidades de aceleración, experimentan un aumento en la temperatura que produce una disminución en los parámetros nominales de los elementos que los componen, en consecuencia, afectaría los valores esperados durante su comisionamiento. Para eliminar el calor disipado por los incrementos de temperatura en los componentes del acelerador, se utiliza helio líquido con el fin de lograr imanes y cavidades de aceleración superconductoras.
- **Sistemas de inyección/extracción:** Experimentos recientes en aceleradores de última generación, han logrado entregar haces de partículas con energías de colisión del orden de los TeV; a causa de la creación de nuevos materiales; el desarrollo de nuevas tecnologías y, además, el aumento en la precisión de las técnicas de aceleración han sido la clave para obtener ese orden de energías. Permiten guiar las partículas dentro / fuera del acelerador o de un acelerador a otro.

3.1.2. Orígenes de aceleradores

Los orígenes de los primeros aceleradores se remontan al año 1932, con el comisionamiento del primer prototipo construido por Jhon Douglas Cockcroft y Ernest Thomas Sinton Walton, un acelerador de corriente directa (DC) que permitió acelerar un haz de protones con energía de 400 KeV, con el objetivo de bombardear un núcleo de litio para lograr su desintegración⁶. Sin embargo, el uso de campos electromagnéticos para incrementar la energía cinética de una partícula cargada, tiene sus orígenes a mediados del siglo XIX, con el descubrimiento de los tubos de rayos x, un prototipo básico de acelerador elaborado con elementos fundamentales como son: una fuente de partículas, un tubo de vacío y una estructura de aceleración.(ver figura 3-1). En un tubo de rayos x el principio de funcionamiento se basa en el uso de campos eléctricos para incrementar la energía cinética de un haz de partículas cargadas, las cuales han sido obtenidas por procesos de emisión termoiónica. Todas las partículas aceleradas chocan a altas velocidades con un blanco fijo, de tal forma que durante está colisión produce radiación electromagnética conocida como rayos X.

⁵En el caso de aceleradores de resonancia, las cavidades de radiofrecuencia son elaboradas con materiales superconductores para incrementar o disminuir la energía de las partículas que conforman el haz.

⁶Para una descripción detallada y completa ver [9]

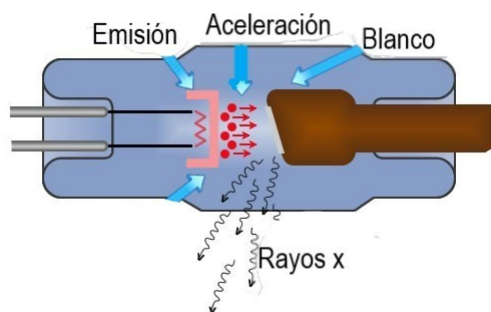


Figura 3-1: tomado de <http://www.e-sanitas.edu.co/Cursos/radio>

Después de los descubrimientos de los tubos de rayos x y el acelerador de Cockcroft and Walton, surgieron nuevos aceleradores con diseños cada vez más elaborados, cada uno de ellos logro aumentar progresivamente la energía cinética del haz, sin embargo, estos dispositivos tenían ciertas limitaciones en el tope máximo de energía alcanzada por las partículas que conforman el haz durante el proceso de aceleración. Los diferentes aceleradores se han clasificado de acuerdo al método de aceleración, ya sea por campos electrostáticos, o campos variando en el tiempo.

Los primeros aceleradores usaban campos electrostáticos para su funcionamiento (ver figura 3-2), una diferencia de potencial aplicado entre dos placas metálicas suministra una aceleración a partículas cargadas presentes dentro del cuerpo del acelerador, por ejemplo, tubos de vacío. Partiendo de la segunda ley de newton, y el uso de la relación entre el campo eléctrico y la diferencia de potencial entre dos placas paralelas, tendríamos:

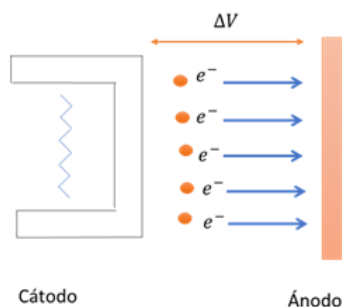


Figura 3-2: Acelerador electrostático simple

$$a = \frac{\Delta v}{q_e m_e d} \quad (3-1)$$

De la ecuación 3-1 se evidencia la dependencia de la aceleración de las partículas cargadas en términos de la separación de las placas y del voltaje aplicado, lo cual termina siendo

un problema en términos de tamaño y eficiencia, ya que estos aceleradores estaban lejos de alcanzar el voltaje deseado, limitando por un tiempo los avances en el proceso de optimización de la energía suministrada al haz de partículas; los principales aceleradores construidos con este principio físico al igual que sus valores máximos de energía se pueden encontrar en la tabla **3-3**.

Para solucionar los problemas presentados en los aceleradores con campos electrostáticos, surgen nuevos prototipos basados en campos electromagnéticos variables en el tiempo, con el objetivo de ampliar los gradientes de aceleración⁷. Es importante aclarar que, con la aplicación de este nuevo principio, surgen dos nuevas clasificaciones, aceleradores circulares y lineales.

3.1.3. Tipos de aceleradores de partículas

Aceleradores lineales

Son estructuras compuestas por instrumentación especial que acelera haces de partículas cargadas, empleando para ello el uso de campos eléctricos oscilantes durante una trayectoria diseñada, la cual corresponde con una línea recta. Históricamente los aceleradores lineales han incrementado la energía que entrega a los haces de partículas gracias al cambio en los métodos de aceleración, por un lado se encuentran los que aceleran las partículas con la aplicación de un voltaje producido por campo eléctrico constante y, por el otro lado, los aceleradores que cuentan con cavidades que incrementan la energía de las partículas, ya sea por cavidades de radiofrecuencia o, por aquellos que utilizan celdas de inducción que proporciona un aumento de energía de $e(V_0 + nV)$ cada vez que entra en una celda del acelerador⁸; una clasificación general se encuentra en la tabla(**3-1**).

Método de aceleración		
Campos electrostáticos	Campos electromagnéticos	
DC guns	Resonantes	No Resonantes
Crookroft-Walton	Aceleradores lineales	Aceleradores lineales
Van de Graff	con cavidades de radiofrecuencia	por inducción

Tabla 3-1: Clasificación de los aceleradores lineales de acuerdo a su método de aceleración

⁷En física de aceleradores el termino gradiente de aceleración corresponden al cambio en el producto de la energía por unidad de carga dividida por la distancia recorrida para obtener esa energía. A mayor gradiente, mayor energía suministrada al haz de partículas.

⁸Una descripción más detallada de cada uno de estos aceleradores se encuentra en [10, pág 310]

Aceleradores circulares.

Son estructuras que incrementan la energía cinética de un conjunto de partículas confinadas en tubos de vacío cuya trayectoria de referencia coincide con una geometría circular. Las líneas de transporte que guían y focalizan el haz en estos aceleradores hacen uso de fuerzas magnéticas producidas por campos magnéticos variables. Los campos magnéticos generados por los elementos que componen la línea de transporte deben garantizar un enfocamiento transversal y a su vez guiar las partículas a través de la trayectoria de referencia. Las ecuaciones que rigen el movimiento de las partículas son:

$$n = \frac{-r}{B} \frac{\partial \vec{B}}{\partial R} \quad (3-2)$$

En donde el valor de n debe estar entre

$$0 < n < 1 \quad (3-3)$$

Un problema sobre el movimiento producido por campos variables es el valor del índice de gradiente de campo, por un lado, cuando n incrementa su valor las fuerzas de enfocamiento transversal aumentan en compensación con la disminución de las fuerzas radiales. En caso contrario la disminución de n trae el efecto inverso, lo cual es un problema a la hora de la construcción de un acelerador, ya que para compensar los efectos, el radio del acelerador y los campos magnéticos variables deben incrementar con conforme aumenta la energía del haz.

La solución para evitar las limitaciones del índice de gradiente de campo fue utilizar elementos magnéticos que cumplieran tareas por separado, es decir, se definen una clase especial de elementos magnéticos que curvan la trayectoria de las partículas con respecto a una trayectoria de referencia y otros elementos, a los cuales se le asigna la función de focalizar el haz transversalmente. De esta manera surge un nuevo concepto trascendental para el diseño de la línea de transporte en un acelerador, lo que en física de aceleradores se conoce como AGS (Alternating Gradient Synchrotron) o simplemente **Weak Focusing (Enfocamiento fuerte)** [11].

Método de aceleración: Campos electromagnéticos	
Resonantes	No Resonantes
Ciclotrón	Betatron
Sincrotón	
Anillos colisionadores	

Tabla 3-2: Clasificación de los aceleradores circulares de acuerdo a su método de aceleración

En aceleradores circulares un cambio en la trayectoria de la partícula (deflexión) durante el recorrido produce una emisión de radiación electromagnética, conocida como la radiación de sincrotrón, una cantidad que está relacionada con el radio del acelerador, la masa de la partícula y su respectiva energía.

$$P_s = \frac{e_0^2 \times c}{6 \times \pi \times \epsilon_0 \times \rho^2} \left(\frac{E}{m \times c^2} \right)^4 \quad (3-4)$$

La ecuación 3-4 corresponde a la potencia de radiación de sincrotrón de un partícula cargada en presencia de campos magnéticos transversales externos. Como resultado de la anterior ecuación, se puede deducir que la energía radiada es mucho mayor en electrones que en protones, lo cual obliga al incremento del radio del acelerador y disminuir la intensidad del campo magnético para compensar la pérdida de energía por radiación cuando se emplean haces de electrones. En virtud de lo anterior, Las maquinas con valores nominales altos de gradiente de aceleración trabajan con haces de protones o antiprotones, en cambio, para aquellos experimentos que requieren mayor precisión se utilizan haces de electrones.

3.1.4. Aplicaciones de los aceleradores

Sin embargo, los experimentos llevados a cabo en los aceleradores, no solo cumplen con la función de desentrañar los orígenes y secretos del universo, sino también han permitido aumentar durante los últimos años diferentes campos de aplicación tales como: la medicina, la seguridad portuaria, la seguridad nacional, la computación y el arte entre otros. Sin duda, los resultados de aplicar la física de aceleradores han sido de beneficio, tanto para la investigación en física fundamental, como también para el desarrollo y beneficio de una sociedad. Una clasificación de los tipos de aceleradores, máximo de energía alcanzada en su primer comisionamiento y sus aplicaciones se puede ver en las tablas (3-3) y (3-4).

Acelerador	Máximo de energía	Aplicaciones
Tándem 1929	24,5[MeV]	Producción económica de neutrones. Física del estado sólido. Modificación de materiales por haz de iones (semiconductores, metales, cerámicas y lentes entre otros.) Física atómica. Análisis de materiales con espectroscopia de retrodispersión Rutherford. Emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE). Emisión gama inducida por partículas. Análisis de reacciones nucleares. Espectrometría. Astrofísica.
Cockcroft – Walton 1932	700[KeV]	Investigación básica en física nuclear. Análisis de reacciones nucleares. Modificación de materiales: implantación iónica y mezcla de iones (semiconductores, metales, cerámicas y lentes entre otros).
Van de Graaff 1929	1[MeV]	Análisis de materiales:espectroscopia de retrodispersión Rutherford. Emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE) Emisión gama inducida por partículas. Aplicaciones de micro haces de iones. Imágenes de rayos X. Espectrometría.

Tabla 3-3: Aceleradores lineales: clasificación y máximo de energía alcanzada en su primer comisionamiento.[5, 11, 12]

Acelerador	Máximo de energía	Aplicaciones
Betatrón Campos alternantes (No resonantes) 1940	1[MeV]	Seguridad aduanera: control de camiones por radiografía Rayos x: inspección de defectos en estructuras, inspección del proceso de fundición y soldadura. Radioterapia
Ciclotrón Campos alternantes (resonantes) 1931	80[KeV]	Producción de radioisótopos Tomografía por emisión de positrones (PET) Marcación de moléculas. Estudios de reacciones nucleares a bajas energías Estudios de mecanismos de síntesis a ultra micro escala. Modificación de materiales por radiación. Desarrollo de nuevos materiales. Farmacodinámica. Nuevos materiales Radioterapia
Sincrotrón Campos alternantes (resonantes) 1968	33[GeV]	Caracterización de materiales moleculares. Radioterapia con partículas pesadas. Arqueología y ciencias forenses. Desarrollos industriales. Litográfica en microestructuras. Estudio de superficies Micro maquinado Nanociencia.
Anillos colisionadores Campos alternantes (resonantes) 1968	30[GeV]	El origen de la masa Materia oscura. Bing Bang.

Tabla 3-4: Aceleradores circulares, clasificación y máximo de energía alcanzada en su primer comisionamiento[5, 11, 12]

3.2. Dinámica de partículas en campos electromagnéticos

Las ecuaciones de movimiento del haz se basan en los planteamientos físicos de las teorías de la mecánica clásica y la electrodinámica, sin embargo, causa curiosidad dada la naturaleza de las partículas que conforman el haz, no encontrar referentes teóricos basados en un enfoque

cuántico en las ecuaciones que describen la dinámica del movimiento del haz. Cabe señalar que el uso de las teorías clásicas ha sido un éxito, considerando que su uso es basado en el hecho de que la longitud de onda de De Broglie de las partículas aceleradas es demasiado pequeña comparada con las cavidades de radiofrecuencia y los elementos magnéticos presentes en los aceleradores, es decir, los efectos cuánticos se consideran despreciables por las dimensiones del sistema (para una mayor descripción ver [13]).

El haz durante su movimiento al interior de un acelerador interactúa a lo largo de su recorrido con un sistema de instrumentación especial que componen las líneas de aceleración y transporte encargadas de acelerar, guiar y focalizar las partículas durante el funcionamiento de un acelerador. Con respecto al funcionamiento de estos instrumentos, es pertinente aclarar que en su interior hace uso de campos eléctricos y magnéticos para incrementar la energía cinética de las partículas, logrando mantener el haz altamente energético y lo más compacto posible, con el fin de optimizar la luminosidad para los diferentes propósitos en los que es empleado en la física de altas energías.

3.2.1. Campos electromagnéticos y cargas en movimiento

En un acelerador circular para guiar, enfocar y acelerar un haz de partículas es necesario recurrir a la fuerza de Lorentz[14, pág. 31], considerando que la electrodinámica establece que solo por medio de las interacciones entre campos eléctricos y magnéticos y una partícula cargada en movimiento se puede cambiar la trayectoria.

$$F = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3-5)$$

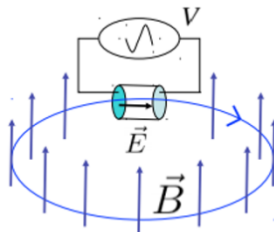


Figura 3-3: Representación de las estructuras de aceleración y focalización de un acelerador circular.

Ambos componentes de (3-5) se utilizan en la deducción de las ecuaciones de movimiento de un haz de partículas dentro de un acelerador, por un lado, El primer término corresponde a la fuerza que experimenta una partícula al interactuar con un campo eléctrico \vec{E} , el haz experimenta un movimiento longitudinal debido a la tensión producida por un sistema de

cavidades de radiofrecuencia⁹ oscilante, la línea de estudio de este tipo de movimiento se conoce como dinámica longitudinal [15, pág. 191] y por el otro lado, el segundo termino describe la fuerza que experimenta una carga en movimiento al interactuar con un sistema magnético que cumple con la función de guiar y focalizar el haz en su recorrido por la línea de transporte de un acelerador circular, en este capítulo haremos referencia únicamente a los efectos producidos por los campos magnéticos, conocido también como dinámica transversal[15, pág.191].

- **Dinámica longitudinal:** En un acelerador circular existen unas estructuras compuestas por un sistema de instrumentos de aceleración que permite incrementar la energía cinética de las partículas haciendo uso de campos eléctricos variables, los cuales incrementan la energía del haz cada vez que interactúa la cavidad de radiofrecuencia con el haz en el comisionamiento del acelerador. Las partículas en presencia de campos eléctricos variables describen lo que se conoce en física de aceleradores como oscilaciones de sincrotrón, la deducción de las ecuaciones de movimiento en esta dirección se conoce como dinámica longitudinal.
- **Dinámica transversal:** En un acelerador circular durante el recorrido, las partículas experimentan una fuerza capaz de guiar y focalizar el haz alrededor de una trayectoria diseñada (o al menos muy cerca de ella), las partículas en presencia de este tipo de campos describen lo que se conoce como oscilaciones de betatron, en la literatura de la física de aceleradores se conoce como dinámica transversal a la principios físicos que describen esta clase de movimiento. Dentro de la terminología de la física de aceleradores las la línea de transporte encargadas de guiar y focalizar el haz se conoce como la óptica de un acelerador; a continuación, se describe los fundamentos básicos de la óptica de un acelerador y los referentes teóricos que rigen los campos electromagnéticos usados en el control del haz.

3.2.2. Ecuaciones de Maxwell y campos magnéticos multipolares

Como se estableció con anterioridad, los fundamentos de la física de aceleradores basan su marco teórico en la utilización de las teorías clásicas de la electrodinámica y la mecánica clásica. Es importante recordar que la teoría electromagnética de campos descansa en las cuatro leyes del electromagnetismo reconocidas en la literatura como las ecuaciones de Maxwell (ecuaciones 3-6), estas ecuaciones describen los comportamiento de los campos eléctricos

⁹Estructuras metálicas superconductoras diseñadas con una estructura interna capaz de generar campos eléctricos variables que incrementan la energía cinética del haz. (para mayor información ver [15, Sección 6.])

y magnéticos, la relación entre ellos y, las cargas y corrientes que los crean.

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{B} &= \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon}\end{aligned}\tag{3-6}$$

Las ecuaciones de Maxwell permiten describir el comportamiento dinámico entre campos electromagnéticos y cargas en movimiento producto de su interacción al interior del acelerador, de ahí, que cualquier acelerador de partículas tengan diferentes instrumentos diseñados para cumplir con la función de ser fuentes de campos electromagnéticos, los cuales son considerados a menudo estáticos o, que varían lentamente en el tiempo (cuasi estáticos, es decir independientes del tiempo), con el fin de guiar, focalizar y compactar el haz en lugares donde se encuentran las regiones de interacción¹⁰.

Con respecto a los dispositivos conviene decir que a la hora de su construcción deben cumplir con dos características principales, por un lado, la ausencia de carga libres ($\rho_{libre} = 0$) y, por el otro, el uso de campos estáticos, lo cual garantiza que el haz durante el recorrido dentro de la línea de conducción cruce libremente cuando su recorrido corresponda con el eje del dispositivo. Las ecuaciones de Maxwell para estos dispositivos son:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{B} &= 0 & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= 0 & \nabla \cdot \vec{E} &= 0\end{aligned}\tag{3-7}$$

3.2.3. Multipolos magnéticos y línea de transporte

Dentro del enfocamiento fuerte existen diferentes imanes utilizados en la línea de transporte del acelerador, cada uno de ellos con una configuración de campo magnético específico, los cuales ejercen diferentes fuerzas sobre las partículas cargadas que interactúan al interior de los imanes. Los campos magnéticos de los diferentes elementos que conforman la línea de transporte pueden ser expresados en términos de una expansión multipolar, a continuación en la tabla(3-5) se establecen las ecuaciones de campo magnético para cada uno de los diferentes elementos magnéticos de un acelerador circular, su deducción se puede encontrar en [15, sección 3.1.5.]

¹⁰Lugares donde se produce las colisiones para el estudio de la física de altas energías

Número de polos	Campo generado		Función
	Normal	Rotada (skew)	
Dipolo	$\frac{B_x}{B\rho} = 0$ $\frac{B_y}{B\rho} = k_x$	$\frac{B_x}{B\rho} = -k_y$ $\frac{B_y}{B\rho} = 0$	Curvar la trayectoria del haz sobre una trayectoria cerrada.
Cuádruplo	$\frac{B_x}{B\rho} = ky$ $\frac{B_y}{B\rho} = kx$	$\frac{B_x}{B\rho} = -kx$ $\frac{B_y}{B\rho} = ky$	Enfocar en los planos transversales(x,y)
Sextupolo	$\frac{B_x}{B\rho} = mxy$ $\frac{B_y}{B\rho} = \frac{1}{2}m(x^2 - y^2)$	$\frac{B_x}{B\rho} = -\frac{1}{2}m(x^2 - y^2)$ $\frac{B_y}{B\rho} = mxy$	Correcciones cromáticas del haz (partículas con momento diferente al de referencia)

Tabla 3-5: Campos multipolares de elementos rotados y normales en un sistema de coordenadas cartesianas

En física de aceleradores el concepto de **gradiente alternante** (Alternating Gradient) o simplemente **enfocamiento fuerte** (Weak Focusing) hace referencia al uso de una configuración especial de cuadrupolos magnéticos con polaridad alternante, cada uno de ellos ubicados a lo largo de una línea de transporte del acelerador, con el fin de focalizar y compactar el haz vuelta tras vuelta, para lograr el mayor número posible de colisiones en aquellas regiones del acelerador donde están ubicados los experimentos.

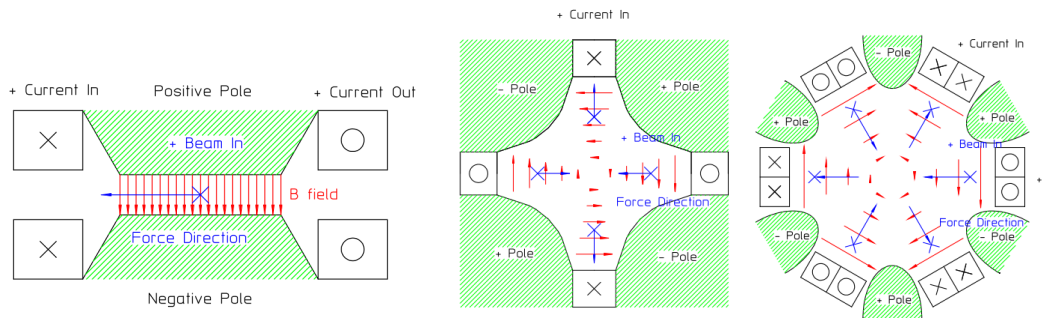


Figura 3-4: Representación esquemática de los campos para diferentes elementos magnéticos que componen la línea de transporte del acelerador.

De acuerdo a la figura¹¹ (3-4), las fuerzas que produce el campo magnético de los cuadrupolos es proporcional a la distancia con respecto al origen, es decir, una partícula cargada que atraviesa por el centro del imán, no experimenta ninguna fuerza y continua su trayectoria sin cambios. Por el contrario, entre más alejada se encuentre del centro, el imán ejerce una fuerza proporcional que enfoca el haz en el plano horizontal y desenfoca en el plano vertical. Sin embargo, para mantener el haz compacto en los dos planos, se hace necesario el uso de

¹¹Las imágenes utilizadas es las figuras (3-4) y (3-5) fueron tomadas de [16]

cuadрупolos rotados (skew), los cuales logran el efecto contrario, es decir, desenfoca el plano horizontal y enfoca en el plano vertical.



Figura 3-5: Electroimanes reales utilizados en la línea de transporte de un acelerador circular.

3.2.4. Análisis dinámico: Ecuación de movimiento

En la física de aceleradores uno de los principales objetivos de la dinámica transversal es plantear y solucionar la ecuación que rige el movimiento de partículas cargadas en presencia de campos magnéticos externos, permitiendo comprender el funcionamiento del acelerador y, el de sus respectivos componentes que conforman la línea de transporte del acelerador. Durante el comisionamiento, las partículas recorren las líneas de transporte del acelerador, trazando trayectorias cercanas a una órbita de referencia que concuerda con la geometría circular del acelerador.

Sin embargo, es conviene enfatizar en la importancia que tiene la elección de un sistema de coordenadas apropiado para la deducción de las ecuaciones de movimiento de una partícula en un acelerador circular, en la figura **3-6** se describe el sistema propuesto para describir el movimiento de partículas cargadas en un acelerador circular. Las coordenadas elegidas son el sistema de Frenet–Serret conocido también con el nombre de coordenadas curvilíneas naturales [15][pág.47], las cuales permite elegir la coordenada axial \hat{s} como dirección de la trayectoria de referencia de la partícula y las coordenadas transversales (\hat{x}, \hat{y})

- \hat{s} : Representa la coordenada en la dirección de desplazamiento de la partícula.
- (\hat{x}, \hat{y}) : Representa las coordenadas ortonormales del desplazamiento transversal de las partículas con respecto a s .
- ρ : Representa el radio de la trayectoria de referencia de la partícula.

Para la deducción de las ecuaciones de movimiento transversal desde un punto de vista dinámico, es necesario retomar la ecuación que da cuenta de las fuerzas que experimentan las partículas cargadas en presencia de campos magnéticos externos generados al interior del acelerador, de la ecuación 3-5 tenemos que :

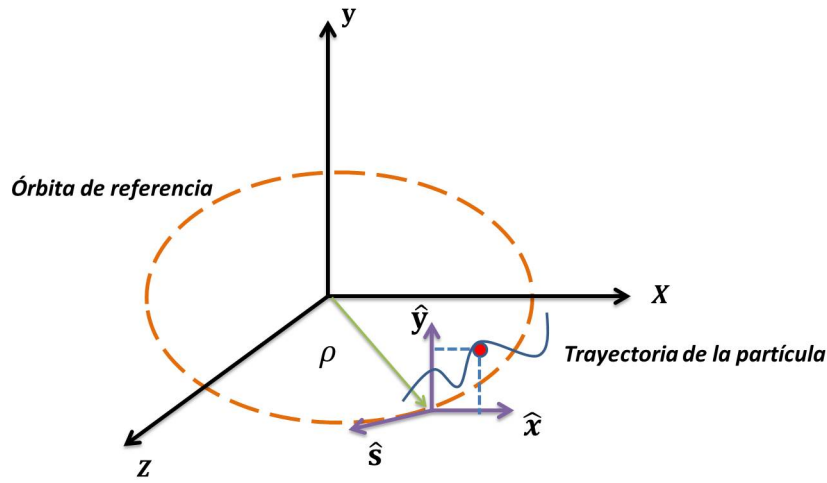


Figura 3-6: Sistema de coordenadas naturales curvilíneo para el análisis de la trayectoria de una partícula en un acelerador circular.

$$F = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3-8)$$

de manera que mientras el haz recorre la línea de transporte del acelerador experimenta una fuerza que guía, focaliza y compacta el haz alrededor de una órbita diseñada, por medio de un sistema complejo de campos magnéticos estáticos. Teniendo en cuenta las ecuaciones de Maxwell en el vacío 3-7 y la fuerza de Lorentz 3-5, las ecuaciones de movimiento en coordenadas curvilíneas descritas desde un marco de referencia no inerciales son :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B}) + \vec{F}_{centrifuga} \quad (3-9)$$

En donde \vec{p} es el momentum, q es la carga de la partícula, \vec{v} es la velocidad longitudinal y \vec{B} el campo magnético genérico. Haciendo uso del momentum relativista $\vec{p} = m\gamma v$, los componentes horizontales y verticales de 3-9 para el caso en que ($\gamma = cte$) es:

$$\begin{aligned} m\gamma\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) &= -qvB_y + m\gamma\frac{v^2}{\rho + x} \\ m\gamma\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right) &= -qvB_x \end{aligned} \quad (3-10)$$

En donde B_x y B_y representan el campo magnético horizontal y vertical respectivamente, ρ el radio de la órbita de referencia, v la velocidad longitudinal y q la carga de la partícula. Por simplicidad y sin restringir la generalidad de las ecuaciones (3-10) , se considera que el efecto de los dipolos en la curvatura del haz ocurre únicamente en el plano x. Los campos magnéticos lineales puede ser expresados en términos de una expansión de primer orden en

x y y , es decir:

$$\begin{aligned} B_x(s) &= \frac{\partial B_y}{\partial x} y = B'(s)y \\ B_y(s) &= B_0 + \frac{\partial B_y}{\partial x} x = B_0 + B'(s)x \end{aligned} \quad (3-11)$$

Haciendo un cambio de variable $t \rightarrow s$, aplicando la regla de la cadena y ciertas operaciones algebraicas la ecuación (3-10) quedaría expresada como¹²:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{ds^2} + \left[\frac{1}{\rho^2} + \frac{B'(s)}{B\rho} \right] x &= 0 \\ \frac{d^2 y}{ds^2} - \frac{B'(s)}{B\rho} y &= 0 \end{aligned} \quad (3-12)$$

Estás son las ecuaciones básicas de movimiento en una aproximación lineal para la trayectoria de una partícula en los planos horizontal y vertical respectivamente, de forma simplificada las ecuaciones (3-12) se conocen como la ecuación de Hill, la cual se representa como:

$$z'' + K_z(s)z = 0 \quad (3-13)$$

En donde:

- Z : Representa cualquiera de los dos ejes transversales x o y
- $K_z(s)$: Es una función periódica de s y representa las fuerzas sobre la partícula a lo largo de la trayectoria, campos magnéticos de los dipolos, cuadrupolos y sextupolos.

cuya solución viene dada por:

$$Z(s) = \sqrt{2J\beta(s)} \sin(\psi(s) - \delta) \quad (3-14)$$

Siendo β_s las funciones beta y $\psi(s)$ el avance de fase del acelerador parámetros que son exclusivos de la configuración del campo magnético que compone la línea de transporte del acelerador.

3.2.5. Análisis óptico: Matrices de transferencia.

La ecuación (3-13) describe el movimiento transversal de las partículas atravesando los campos magnéticos producidos por los imanes dipolares y cuadrupolares utilizados para guiar y focalizar el haz durante su trayectoria. En física de aceleradores el análisis del movimiento

¹²Todo el detalle en la deducción de las ecuaciones 3-12 se puede encontrar en [11][sección 3.2]

del haz al atravesar los elementos magnéticos es similar al efecto producido por un conjunto de lentes a un rayo de luz en óptica geométrica.

De acuerdo a la figura (3-4) los campos magnéticos de los elementos cuadrupolares ejercen una fuerza que compacta el haz en un plano y desenfoca en otro, lo que requiere el uso alternativo de cuadrupolos que enfoquen y desenfocan el haz en ambos planos, en el teoría del gradiente alternante se conoce a esta estructura con el nombre de FODO celda. Cada una de estas celdas contiene un cuadrupolo de enfoque horizontal (F), un espacio libre (O), un cuadrupolo de desenfoque horizontal (D) y otro espacio libre (O). En el análisis óptico se considera un espacio libre al lugar donde se encuentran ubicados los imanes dipolares, elementos magnéticos diseñados para curvar la trayectoria del haz sobre una órbita cerrada. La figura (3-7) representa esquemáticamente una partícula que atraviesa diferentes cuadrupolos interpretados como lentes magnéticas y que compone la unidad básica de la línea de transporte del acelerador.

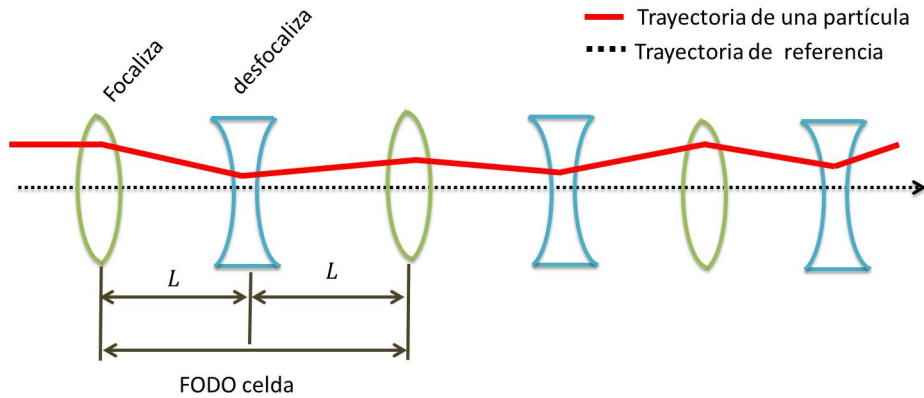


Figura 3-7: Representación de una partícula atravesando elementos magnéticos simbolizados como lentes ópticas

Durante el recorrido de la partícula a lo largo del acelerador, los valores del vector X irán cambiando bajo la influencia de los efectos producidos por los campos magnéticos de los dipolos, cuadrupolos y sextupolos, todos estos efectos se pueden representar a través de una matriz de transporte M si se conoce el valor del vector X en un cierto punto del acelerador s_1 , los valores del vector X' en otro punto s_2 se pueden expresar como:

$$X = MX' \quad (3-15)$$

En donde las variables para el análisis óptico del movimiento son las posiciones y las pendientes (x, x') , cada elemento del acelerador es representado por una matriz característica M_j

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}_{s_2} = M_n \dots M_i \dots M_o \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}_{s_1} \tag{3-16}$$

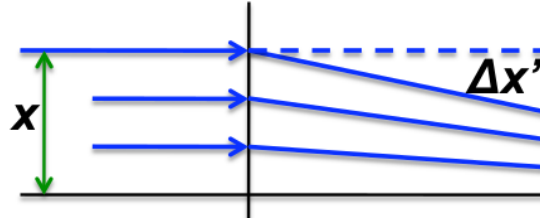


Figura 3-8: Representación esquemática de los dos variables que componen la el análisis en una fodecelda

cada una de las matrices $M_n \dots M_i \dots M_o$ describen una sección con $K(s) = constante$. De esta forma, se puede obtener una matriz que represente cada uno de los efectos producidos por la interacción de una partícula cargada atravesando cada uno de los elementos magnéticos que componen la línea de transporte del haz (dipolo, cuadrupolo, sextupolo, etc) . La formalización matemática de cada una de estas matrices para cada uno de los elementos magnéticos puede encontrarse en[15][sección 4.2]. Las matrices M_D , M_{QD} , M_{QF} y sus representaciones esquemáticas para los elementos de una fodecelda en la aproximación de lente delgada son:

$$M_D = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_{QD} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ kl & 1 \end{pmatrix}, \quad M_{QF} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -kl & 1 \end{pmatrix} \tag{3-17}$$

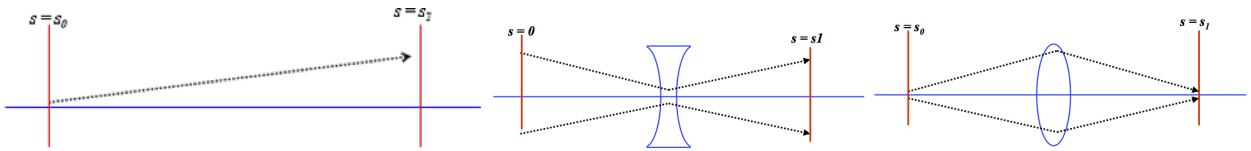


Figura 3-9: Representación esquemática de los cambios producidos en las trayectoria de una partícula al atravesar los diferentes elementos magnéticos que componen la fodecelda

3.2.6. Concepto de emitancia en la dinámica transversal del haz.

Durante el recorrido a través del acelerador, las partículas experimentan un cambio en las variables (z, z') producto de la interacción entre los campos magnéticos de la línea de transporte y las partículas cargadas que conforman el haz. Cada cambio de estas variables tiene

asignado una gráfica de espacio de fase, de modo que la emitancia se define como el área del espacio de fase ocupada por un conjunto de partículas, en donde su forma geométrica corresponde a una elipse para el caso lineal. De acuerdo con la ecuación diferencial, si $k(s) = \text{constante}$, la solución corresponde con el oscilador armónico y sus respectivas gráficas se muestran en la figura (3-10).

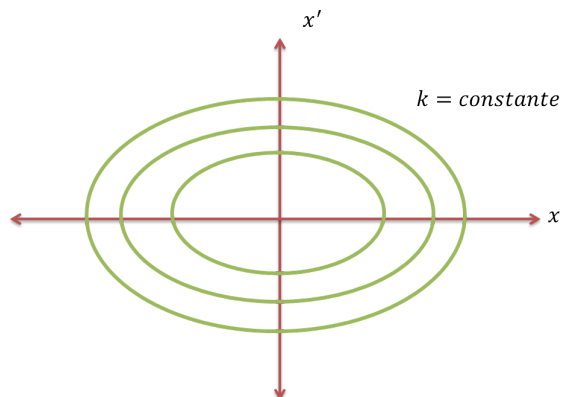


Figura 3-10: Representación esquemática del espacio de fases

La emitancia es por lo tanto una propiedad inherente, la cual permite caracterizar la calidad del haz, es decir, su medición da cuenta del tamaño por medio de un área interceptada del espacio de fases de seis dimensiones, sin embargo, para el caso del movimiento transversal y descartando movimientos acoplados, la emitancia se caracteriza únicamente por el área de los espacios de fase (x, x') y (y, y') .

Para el caso particular de la solución de la ecuación (3-13), el valor $k(s)$ depende exclusivamente de los elementos magnéticos de la red óptica del acelerador, lo que sugiere que el valor de $k(s)$ hace referencia a la rotación del área del espacio de fase, es decir, que a lo largo de la línea de transporte del haz, tanto la orientación, como la forma de la elipse varía de acuerdo al valor característico de cada uno de los elementos magnéticos del acelerador (ver Figura 3-11), sin embargo, de acuerdo con el teorema de Liouville, cada partícula, en ausencia de fuerzas no conservativas, tiene una constante invariante, para el caso de los campos magnéticos de dipolos y cuadrupolos que son conservativos la densidad de partículas en el espacio de fase es constante.

La importancia de la emitancia en un acelerador de partículas radica en la relación estrecha entre el tamaño del haz y la calidad del mismo para los diferentes experimentos realizados en el interior del acelerador. Durante las colisiones, una medida que sirve para cuantificar la calidad del haz es la luminosidad, la cual se define como el número de eventos (colisiones) por segundo y por unidad de sección en las regiones de interacción. Por consiguiente, existe una relación directa entre los conceptos de emitancia y luminosidad, ya que para optimizar la calidad del haz la red óptica del acelerador debe minimizar el área del espacio de fase para

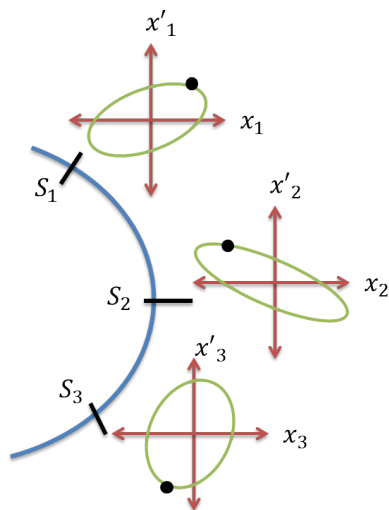


Figura 3-11: Cada gráfica de un espacio de fase es para una ubicación específica en el acelerador, ya que las posiciones de las partículas y los momentos evolucionan a medida que se propaga en la línea de transporte.

obtener una mayor luminosidad.

A continuación en la figura se muestran los espacios de fase

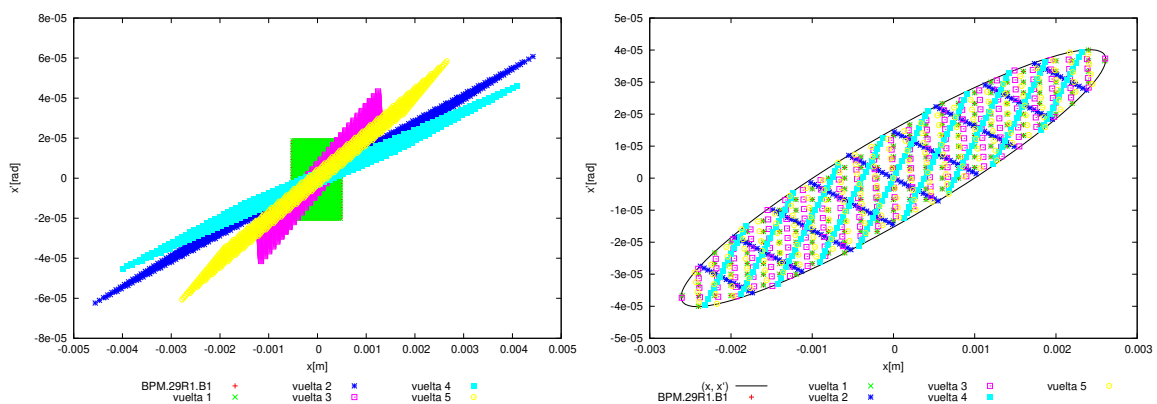


Figura 3-12: Representación esquemática de los cambios producidos en la trayectoria de una partícula al atravesar los diferentes elementos magnéticos que componen la fococelda

En física de aceleradores, tanto el análisis dinámico, como la descripción óptica, son completamente válidas para describir el movimiento de una partícula cargada en presencia de campos magnéticos estáticos. Es necesario recalcar que, la combinación de los dos análisis dan una descripción completa del movimiento, por un lado, el análisis matricial permite dar cuenta de las variables (x, x') de una partícula al entrar y salir de un elemento magnético y, por el otro lado, el análisis dinámico permite describir las mismas variables, pero ahora en

el interior de los elementos magnéticos de la línea de transporte del acelerador.

Es importante aclarar que, para la construcción de la simulación computacional del concepto de gradiente alternante, se tendrá como referente teórico el análisis óptico, dado que la solución de la ecuación (3-14) requiere de la información de las funciones beta β_s y el avance de fase $\psi(s)$ en cada elemento del acelerador, parámetros que dependen exclusivamente de la óptica del acelerador.

Es necesario recalcar que el gradiente alternante es un método que se utiliza en los aceleradores de partículas para guiar, focalizar y compactar el haz durante el comisionamiento de un acelerador. Para concluir, es oportuno reiterar, como al inicio del capítulo, que los fundamentos teóricos que permiten deducir las ecuaciones de movimiento transversal de una partícula, son aquellos conceptos que logran los estudiantes de licenciatura en física apropiados en sus cursos de física mecánica (leyes de Newton), electromagnetismo (fuerza de Lorentz) y relatividad (correcciones relativistas).

4 Aspectos teóricos de las simulaciones

4.1. Sobre el modelo

Desde el origen de la física, uno de sus más grandes retos ha sido lograr describir el comportamiento de la naturaleza que nos rodea, comenzando desde el espacio exterior hasta llegar a los elementos fundamentales que conforman la materia. Durante este recorrido, la física ha logrado acumular un conjunto de teorías que describen los comportamientos físicos de los diferentes sistemas de estudio que aborda, paralelamente han conseguido además la aplicación de dichas teorías a diferentes campos del saber.

Desde luego, el camino para la creación de la teorías necesito de la exploración de diferentes métodos y estrategias que le han permitido analizar, replicar y explicar los diferentes sistemas en los cuales centra su estudio, a tal punto que logra construir teorías, hipótesis y predicciones que permiten replicar y hacer uso de los resultados obtenidos. Sin embargo, en ocasiones los sistema en estudio pueden tener una lista extensa de dificultades, debido a sus propiedades intrínsecas o las limitaciones en los instrumentos de medición.

Es necesario recalcar la creatividad del ser humano para sortear las dificultades a la hora de abordar una situación problema, desde el uso de experimentos mentales, hasta la construcción de instrumentos inexistentes capaces de realizar por ejemplo análisis y tratamiento de sustancia químicas, como también la descripción de sistemas físicos o biológicos con niveles altos de complejidad. Sin embargo, es oportuno aclarar que los instrumentos requieren de costos excesivamente altos y en ocasiones de difícil acceso para la comunidad científica, a causa de ello, los científicos se han visto en la necesidad de generar nuevas métodos para el estudio de estos sistemas físicos, estos métodos han recibido el nombre de modelos, a partir de la idea del autor Robert E. Shannon, podemos definir el modelo como: *“representaciones de un objeto, sistema, o idea, de forma diferente a la entidad misma”*[17, Pág.14]. Dicho eso, es pertinente establecer una clasificación los diversos tipos de modelos, entre ellos podemos encontrar:

- **Modelos físicos:** son aquellos modelos que buscan hallar abstracciones similares a una escala menor de la entidad física, objeto o sistema.
- **Modelos analógicos:** Es el modelo en cual se busca crear una entidad similar que logre reflejar las propiedades del sistema real y que permita encontrar las respuestas

al problema para luego aplicarlas al sistema real.

- **Modelos matemáticos:** estos modelos buscan remplazar el sistema físico por un símbolo que permita representarlo y, obtener un sin número de propiedades del sistema físico también representadas por otros símbolos.
- **Modelos computaciones:** son los modelos que se realizan con el apoyo de una computadora que ejecutara el análisis de los datos y presentara los resultados programados por el usuario.

Los modelos descritos anteriormente suelen ser aplicados a un gran número de experimentos, debido a la dificultad que representan algunos sistemas en su modelado, es por esto, que un modelo debe estar sustentado en una estructura interna acorde al sistema de estudio y estar compuesta por un cumulo de variables, relaciones, limitaciones, funciones y componentes. Es necesario aclarar que el análisis y la selección asertiva de estas propiedades permitirán la elaboración correcta de un modelo, de tal modo que estos modelos deben permitir al experimentador obtener lo siguiente:

- Un apoyo para la comunicación de sus análisis
- Una ayuda para la instrucción
- Una forma de predicción
- Una herramienta para la experimentación

Las similitudes entre el modelo creado y el sistema de estudio es a lo que se denomina grado de isomorfismo¹, lo que puede ser entendido en relación al grado similitud en los siguientes dos apartados.

- La exactitud entre el elemento real y elemento modelado, en una relación uno a uno.
- Las conexiones entre los elementos del sistema real se deben preservar con exactitud en el modelo.

Aquellos modelos que logren cumplir con la primera condición, pero no logran cumplir con la segunda condición, son denominados modelos homomorfos².

Es importante aclarar que los modelos deben cumplir principalmente una de dos funciones esenciales, la primera, corresponde con la función descriptiva que pretende dar explicaciones o comprender el funcionamiento de un sistema físico, y la segunda, hace referencias a la función preceptiva, la cual busca predecir los efectos del sistema replicando con exactitud las características de su comportamiento, aunque se esperaría que, si el modelo creado es capaz de predecir con exactitud los resultados esperados, así mismo, puede también permitir explicar y entender el sistema, sin embargo, cuando ocurre el caso contrario, es decir, en el

¹Relación entre objetos que tienen una estructura igual, idéntica.

²Son aquellos instrumentos que tienen o poseen la misma forma.

que puede cumplirse la primera condición, no implica que se cumpla directamente con la segunda.

Por consiguiente es necesario la creación de modelos con características correctamente extraídas, con una conjunción de los elementos esenciales mencionados, con un grado de isomorfismo adecuado para el experimento, lo cual permitirá que los resultados sean los esperados y, este logre a su vez, solucionar su problema inicial que planteo con base al sistema de estudio, logrando de este modo, explicar, predecir y modificar dicho sistema.

4.2. Sobre la simulación

La simulación es el proceso en el cual el experimentador ejecuta diferentes acciones con el modelo y genera diferentes estrategias de estudio basado en dicho modelo, (Robert E. Shannon). Si bien, esta definición puede ser considerada en cierto grado como abierta o ambigua, debido al gran número de definiciones de simulación existentes, las cuales suelen ser más delimitadas a los propósitos de las áreas donde se estén definiendo y usando. Teniendo en cuenta el argumento de Robert E. Shannon quien afirma que *“El modelado de la simulación es, por lo tanto, una metodología aplicada y experimental”* y está debe poder:

- Describir el comportamiento de sistemas.
- Postular teorías o hipótesis que puedan dar razón del comportamiento del sistema modelado.

Por lo tanto, debemos comprender que las simulaciones siempre estarán sujetas al tipo de modelo que sea escogido para el uso de la misma, y aunque un solo sistema puede ser explicado y simulado desde todos los modelos, no siempre realizar la simulación será un proceso simple, debido a que existe un cierto número de parámetros que impide el libre desarrollo de la simulación.

Cabe señalar la importancia que adquiere el lograr plantear con claridad cuál es el problema que hace imperante la necesidad de generar un modelo, así mismo la idea de cómo moldear y utilizar el modelo, hasta lograr generar el más adecuado es impredecible para una correcta descripción del sistema y de este modo lograr una hipótesis válida para el caso de estudio. A continuación, Banks J.[18] brinda un apoyo esquemático que permite la creación de modelos apropiados, los cuales adquieren gran importancia para el desarrollo de este proyecto.

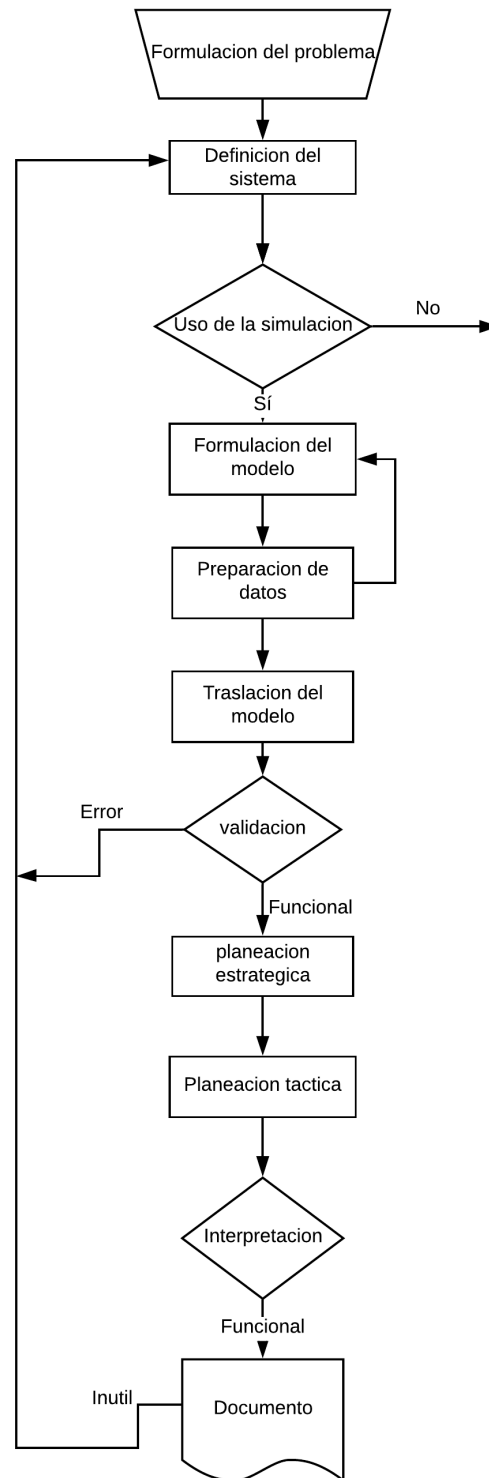


Figura 4-1: Algoritmo.

En la figura 4-1 se describe una estructura lógica que permite la creación de una manera planifica y ordenada de simulaciones basadas en modelos, esta estructura consta de once pasos consecutivos:

1. **Formulación del problema:** definir del motivo por el cual se es necesario la creación de un modelo y el uso de una simulación.
2. **Definición del sistema:** Se debe establecer los límites de acción y la restricción que se tendrán en cuenta para la elección del sistema de estudio.
3. **Formulación del modelo:** abstracción del sistema real y llevado a unos los modelos mencionados anteriormente.
4. **Preparación de datos:** elección de los datos necesarios para el funcionamiento del modelo.
5. **Traslación al modelo:** transcribir el modelo a un lenguaje computacional adecuado para el uso de la simulación.
6. **Validación:** los resultados obtenidos hasta el momento reflejan una relación uno a uno acertada entre el modelo y el sistema real generando un nivel de confianza adecuado para seguir en el desarrollo de la simulación.
7. **Planeación estratégica:** elaboración de un experimento que permita obtener los resultados deseados.
8. **Planeación táctica:** definir los parámetros para cada una de las ejecuciones del experimento.
9. **Experimentación:** ejecución de la simulación generando así los datos deseados y resultados para el análisis de la simulación.
10. **Interpretación:** análisis de los datos y resultados obtenidos.
11. **Documento:** registro documental de la actividades y resultados de la simulación.

Para el desarrollo de este proyecto se decidió tener como referencia el anterior esquema, tomando como herramienta los modelos computacionales, en conjunción con otros modelos, con el fin de poder generar una simulación computacional que nos permita dar cuenta del efecto del gradiente alternante, teniendo como claridad un grado de isomorfismo que mantenga una cierta relación con el sistema real, con el objetivo de que el usuario pueda sentirse familiarizado.

4.3. La simulación computacional

La simulación computacional cobra relevancia en el proceso para determinar las soluciones analíticas que ostentan complejidad a la hora de su desarrollo o en la creación de un modelo

analógico en donde sus costos de implementación son elevados y además podría generar algún tipo de riesgo al experimentador.

En una simulación computacional, también llamado en ocasiones simulador, el experimentador configura su entorno virtual de tal manera que este sea apto de ejecutar una serie de parámetros y condiciones, que puedan dar como resultado una serie de datos, que a su vez permitan su uso para un determinado fin (E.E. Tarifa)[19].

Dentro de la simulación computacional podemos encontrar dos tipos de simulaciones:

- **Analógica:** máquinas de señal analógica³ utilizadas para el control de procesos y análisis de datos.
- **Digital:** Basada en señales eléctricas de tipo digital⁴ se programa en base a un lenguaje de programación.

Para el desarrollo de este proyecto se decidió la utilización de una simulación computacional de tipo digital, debido a que esta simulación cuenta con los siguientes elementos fundamentales:

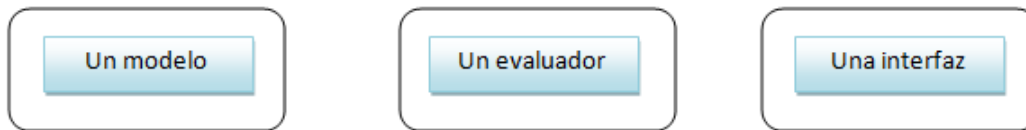


Figura 4-2: Elementos de simulación.

Los elementos mencionados anteriormente cumplen con unas funciones determinadas para el desarrollo exitoso de este proyecto:

- El modelo en la simulación computacional corresponde a la unión de modelos matemáticos, analógicos, estadísticos, entre otros.
- El evaluador es el conjunto de procedimientos que se ejecutarán basándose en la simulación para obtener datos y resultados.
- La interfaz es el elemento dedicado a la comunicación de los elementos de la simulación y sus datos obtenidos con el experimentador, así mismo, la interfaz debe ser clara y sencilla para el usuario, de modo que logre extraer la mayor cantidad de información de la simulación, aspecto crucial que lo diferencia de los modelos analógicos.

³Una señal analógica es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético; que es representable por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y periodo.

⁴es un tipo de señal en que cada signo que codifica el contenido de la misma puede ser analizado en término de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango.

4.4. Sobre el lenguaje de programación

Hasta el momento se ha logrado establecer los sustentos teóricos para la construcción de un modelo eficiente soportado en un diagrama de flujo lógico, que a su vez permitirá el uso de una simulación computacional de tipo digital, de acuerdo a lo expuesto con anterioridad esta simulación debe cumplir con una serie de requisitos, con el fin de lograr construir una herramienta que nos permita lograr el objetivo de este proyecto, a continuación se enuncian los requisitos que son:

- Ser una herramienta para experimentación
- Debe ser capaz de lograr describir el sistema modelado
- Generar datos consistentes para el análisis y divulgación de resultados
- Estar basado en un lenguaje de programación acorde a las necesidades
- Contar con una interfaz gráfica sencilla para el usuario y que le permita la extracción de la mayor cantidad de información posible

En el proceso de búsqueda de un lenguaje acorde a los requisitos descritos anteriormente se logro establecer que el lenguaje de programación apropiado es el lenguaje de programación Python.

“Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. La elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de éste un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas.”(F. L. Van Rossum)[20], existen otras características que hicieron peso a la hora de elegir Python como lenguaje de programación para el desarrollo de esta propuesta, a continuación se describen las principales ventajas :

1. Python se categoriza como uno de los pioneros del Open Source⁵ en cuanto a programación, logrando de este modo ser modificado para que pueda funcionar en diversas plataformas como (Linux, Windows, MacOS, Solaris, OS/2, VxWorks, PlayStation, Sharp Zaurus, Windows CE y PocketPC), evitando la limitaciones económicas para la compra de licencias de uso, por esa razón la simulación pueda ser usada en los sistemas operativos más usados en la actualidad.
2. Python es un lenguaje orientado a objetos⁶ que permite la creación de múltiples objetos y datos que se pueden combinar para generar diversas funcionalidades, permitiendo generar interfaces gráficas unidas a los datos de la simulación para un análisis sencillo

⁵El código abierto es un modelo de desarrollo de software basado en la colaboración abierta.

⁶Los objetos manipulan los datos de entrada para la obtención de datos de salida específicos, donde cada objeto ofrece una funcionalidad especial.

y cómodo.

3. Python permite la incrustación dentro un programa C/C++ y de esta manera ofrecer las facilidades del scripting, facilitando la escritura y la operación con grandes cantidades de información y datos.
4. Python integra una gran cantidad de librerías⁷, tipos de datos y funciones dentro de él, que ayudan a realizar funciones comunes o complejas sin necesidad de tener que programarlas desde cero, esta librerías pueden ayudar a resolver operación matemáticas, organización de datos, exportación de archivos de datos, creación de objetos que logran facilitar la programación.

⁷En informática, una biblioteca o, llamada por vicio del lenguaje librería (del inglés library) es un conjunto de implementaciones funcionales, codificadas en un lenguaje de programación.

5 Simulación computacional del concepto de gradiente alternante

En este capítulo se presenta el desarrollo del proyecto, el cual se encuentra guiado bajo las fases presentadas en el diagrama de flujo presentado en la figura (4-1), por lo tanto, se comienza una descripción que muestra en un paso a paso la aplicación de las 11 etapas mencionadas y los respectivos resultados de las simulaciones propuestas.

5.1. Formulación del problema

El objetivo es generar una herramienta que permita visualizar los efectos de la aplicación del concepto de gradiente alternante en el diseño de una línea de transporte en un acelerador de partículas circular. Debido a las dificultades que presenta el estudio de un acelerador de partículas, ya sea por su tamaño y composición, o por sus costos, se considera necesario, la creación de un modelo que permita el acercamiento a los conceptos fundamentales de la física de aceleradores. Por tal motivo, se ha seleccionado la línea de transporte del haz de partículas como objeto de estudio para la creación del modelo.

5.2. Definición del sistema

Como se describió anteriormente en la sección (3.1.1), existen diferentes tópicos de investigación en el comisionamiento de un acelerador, sin embargo, para la definición del sistema, tendremos en cuenta únicamente la línea de transporte, es decir, el sistema que centra su estudio en el diseño de la red óptica que tiene como objetivo fundamental guiar, focalizar y compactar el haz de partículas, conformado por:

- Las ecuaciones de Maxwell y campos magnéticos multipolares.
- Multipolos magnéticos.
- Ecuación de movimiento.
- Matrices de transferencia.

Durante el proceso para la definición del sistema y, en aras de la creación de un modelo apropiado, no se tendrán en cuenta las siguientes propiedades del sistema de estudio:

- Elemento magnéticos de orden mayor a los cuadrupolos, es decir, sextupolos y octupolos.
- Los efectos colectivos entre las partículas ¹.

5.2.1. Formulación del modelo

Para el cumplimiento de este apartado, se han seleccionado dos tipos de modelos, el primero corresponde con el matemático descrito en el capítulo 2 y, el segundo es el computacional basado en el capítulo 3. Para la creación del modelo se han tenido en cuenta las ecuaciones (3-7), las cuales permitieron la obtención de las ecuaciones de campo para los diferentes elementos magnéticos que componen la red óptica del acelerador:

Número de polos	Campo generado	
	Normal	Rotada (skew)
Dipolo	$\frac{B_x}{B\rho} = 0$ $\frac{B_y}{B\rho} = k_x$	$\frac{B_x}{B\rho} = -k_y$ $\frac{B_y}{B\rho} = 0$
Cuadrupolo	$\frac{B_x}{B\rho} = ky$ $\frac{B_y}{B\rho} = kx$	$\frac{B_x}{B\rho} = -kx$ $\frac{B_y}{B\rho} = ky$
Sextupolo	$\frac{B_x}{B\rho} = mxy$ $\frac{B_y}{B\rho} = \frac{1}{2}m(x^2 - y^2)$	$\frac{B_x}{B\rho} = -\frac{1}{2}m(x^2 - y^2)$ $\frac{B_y}{B\rho} = mxy$

Tabla 5-1: Ecuaciones de campo para los elementos de la red óptica del acelerador.

Las ecuaciones de la tabla (5-1) son graficadas en el programa Python con el modulo matplotlib, arrojando los resultados mostrados en la figura 5-1.

¹En física de aceleradores los efectos colectivos hacen referencia a las fuerzas eléctricas que surgen de la interacción entre partículas cargadas y campos inducidos por el mismo haz. los efectos de carga espacial, beam-beam, entre otros, se describen en detalle en [15, sección 7]

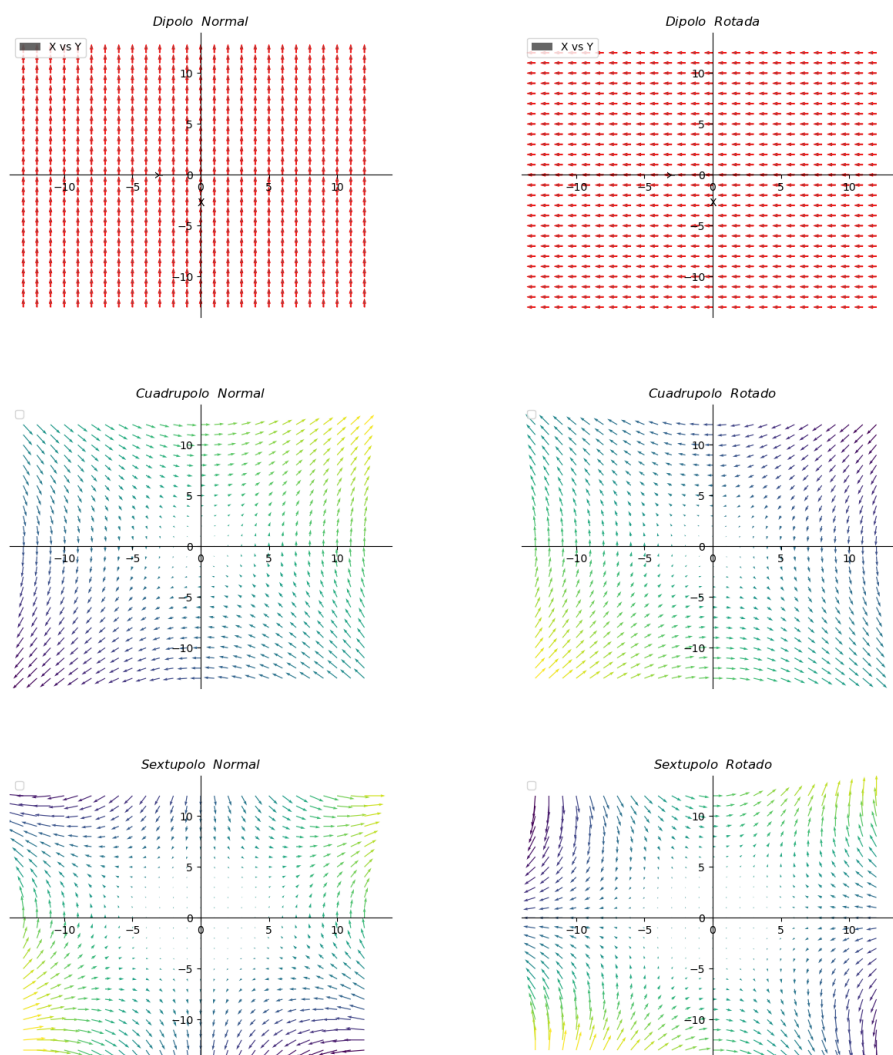


Figura 5-1: Diagrama de campo para diferentes elementos magnéticos que componen la línea de transporte del acelerador.

De acuerdo con los resultado de la figura (5-1), los campos producidos por los diferentes elementos de la línea de transporte ejercen diferentes efecto sobre un conjunto de partículas cargas en movimiento, sin embargo, en todos los casos el centro de los imanes sigue ofreciendo una zona de transito libre para el haz. Es prudente advertir que no se hará uso de los sextupolos en la red óptica del acelerador, ya que para este proyecto se describe la ecuación de movimiento lineal sin considerar efectos no lineales y las correcciones de aberración cromática (ver[11, sección 3.3].

Los diagramas de los campos magnéticos de los dipolos y cuadrupolos son generados por electroimanes de gran tamaño (ver figura 3-5), con el fin de lograr un modelo con un grado

de isomorfismo que mantenga ciertas relaciones uno a uno, y logre ser amigable para el usuario, sea han generado una serie de elementos similares a estos imanes haciendo uso del módulo VPython, a continuación se muestran los resultados obtenidos para los diferentes elementos de la red óptica:

- **Dipolo:**

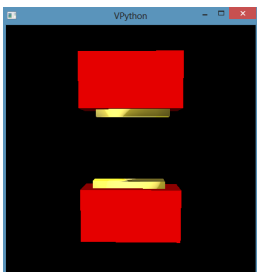


Figura 5-2: Podemos observar dos objetos, que intentan asemejar a los imanes mostrados en la figura 3-5.

Como podemos observar en la figura (5-2), el objeto se encuentra incrustado en una ventana llamada interfaz gráfica, la cual es generada por Vpython y es el lugar donde se ejecutarán todas las simulaciones realizadas. Así mismo, todos los objetos creados en este módulo se encuentran ubicados en un espacio tridimensional (x, y, z) y poseen una gran cantidad de configuraciones para diferentes objetos. Cabe resaltar que estos objetos son inactivos hasta cuando son asignados a una función de movimiento.

- **Cuadrupolo normal y rotado:**

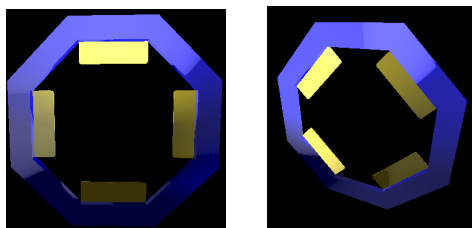


Figura 5-3: Podemos observar otro tipo de figuras creadas a partir de funciones de extrusión de las funciones del módulo VPython orientado a objetos.

En la figura (5-3) podemos observar el modelo de dos cuadrupolos magnéticos que componen una fodo celda, tanto el normal como el rotado, donde se encuentra que los objetos en VPython pueden ser rotados 360° grados alrededor del eje x , o el eje y . Los elementos generados anteriormente pueden ser repetidos para la creación de escenarios dentro de la simulación computacional.

Ecuación de movimiento

La ecuación (3-8) permite la creación de un script capaz de mostrar los vectores de la fuerza ejercida sobre una serie de partículas cargadas que ingresan con una determinada velocidad y posición, esto con el fin de lograr generar una serie de datos que logren contribuir al desarrollo de la simulación.

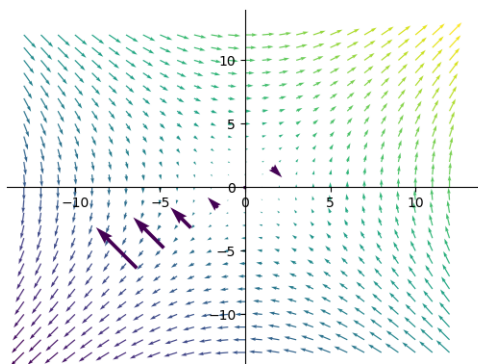


Figura 5-4: Fuerzas que experimentan partículas que ingresan en diferentes puntos del cuadrupolo, la fuerza aumenta conforme las partículas se alejan del centro del imán.

Matrices de transferencia

A partir de la descripción realizada en la sección (3.2.5) sobre el análisis óptico del movimiento de un haz de partículas y, la explicación del concepto de fodo celda, se inicio la construcción de un nuevo modelo que recreara dicha celda unitaria, teniendo como punto de partida los cuadrupolos modelados anteriormente.

De la figura (5-5) es pertinente aclarar que en el caso de los dipolos magnéticos, estos no se representan, ya que, en el análisis óptico son considerados como espacios de deriva en la fodo celda, es decir, no producen cambios en la planos transversales.

Un aspecto relevante en la simulación son los objetos de estudio, en este caso particular se hace referencia a las partículas cargadas, las cuales serán los objetos que tendrán el movimiento dentro de la simulación, logrando mostrar los efectos del gradiente alternante en un acelerador circular. Para lograr generar estas partículas, se parte del uso nuevamente del módulo VPython y, adicional un nuevo módulo llamado random, el cual nos permite crear un número aleatorio de partículas a partir de una distribución particular, que en este caso será una distribución gaussiana, permitiendo así generar una simulación con una relación isomorfa con el sistema real.

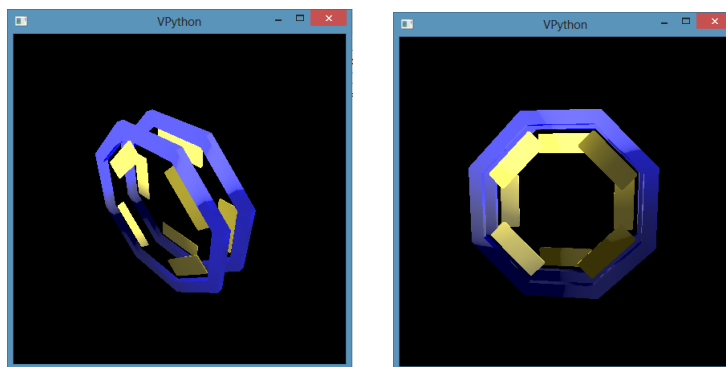


Figura 5-5: Diseño de un cuadrupolo magnético normal y rotado en una FODO celda.

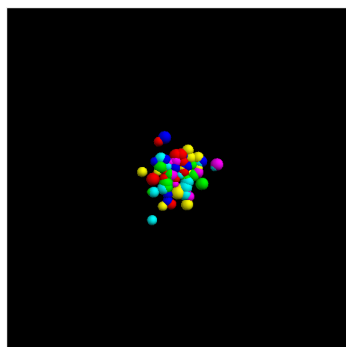


Figura 5-6: Diseño de un conjunto de partículas.

A partir de todos los modelos generados teniendo como referente todos los apartados desarrollados anteriormente, se puede configurar un modelo conjunto para la creación del entorno donde se pretende desarrollar la simulación, se agregaron unos elementos adicionales que permiten hacer amigable el modelo con el usuario.

Con este modelo creado y la conjunción con los modelos matemáticos, se ha logrado formular un modelo final acorde a las necesidades de este proyecto, manteniendo siempre un cierto grado de isomorfismo de relación uno a uno similar al sistema real, compuesto de dos FODO celdas y una sección final denominada triplete, con una cantidad de partículas suficientes para la observación del fenómeno, ubicadas aleatoriamente según una distribución gaussiana.

5.2.2. Preparación de datos

Para la creación de la simulación es propicio la selección de las constantes y variables influyentes en su desarrollo, ya que permiten la obtención de resultados acordes al experimento, los datos seleccionados son:

- Velocidades iniciales.

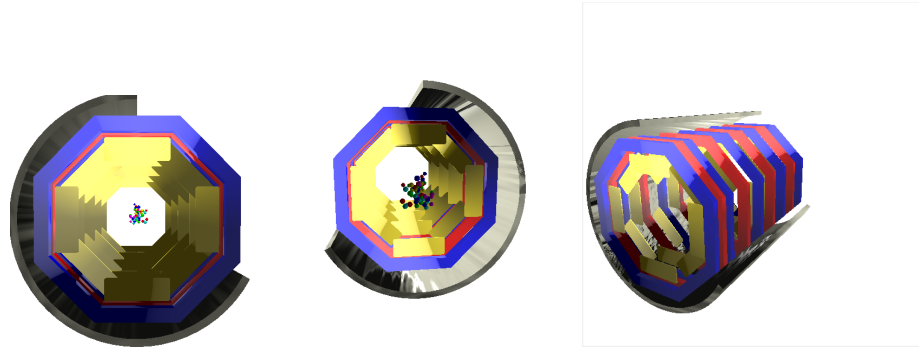


Figura 5-7: Modelo final de una FODO celda.

- Gradiente de campo.
- Separación entre imanes.
- Posiciones iniciales en x.
- Posiciones iniciales en y.
- Posiciones iniciales en z.
- Pendientes iniciales x.
- Pendientes iniciales y.
- Número de partículas.

5.3. Traslación del modelo

A partir del modelo computacional desarrollado anteriormente y los modelos matemáticos descritos, se procede a la escritura del script en el lenguaje de programación Python con ayuda de varias librerías. Basándose en la sección(3.2.5), se hace uso de las matrices de transferencia, con el propósito de determinar las posiciones de las partículas creadas al inicio de la simulación, esto conlleva indirectamente a que los datos obtenidos se visualicen como saltos en el espacio, razón por la cual, se considera necesario el uso de matrices de transporte con una separación entre imanes dividida en varias secciones, es decir, una secuencia de fotografías tomadas en un intervalo de tiempo determinado y luego mostradas de forma secuencial.

El criterio establecido permite mostrar secuencialmente el movimiento de las partículas a través de los campos magnéticos generados por los imanes, de manera que se elaboraron un total de 9 secciones, cada una de ellas divididas en un total de 10 subsecciones. Para cada una de las secciones se encuentra separada por los valores de la separación de los imanes. En cuanto a cada una de las subsecciones, se debe tener en cuenta que genera una número determinado

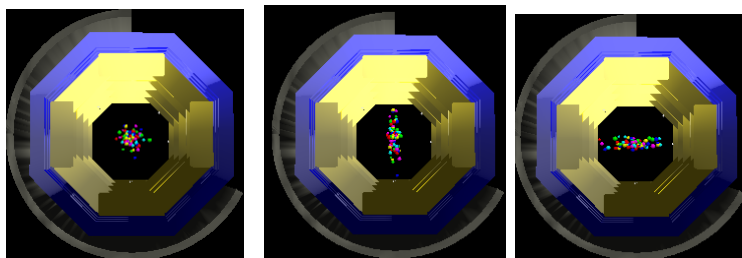


Figura 5-8: Modelo de una secuencia de fotogramas

de datos, que dependiendo del número de partículas ingresado al inicio de la simulación, serán almacenados en unas listas invocadas más adelante, para lograr paralelamente un conjunto de gráficas que nos permitan validar el modelo.

Partiendo de los datos obtenidos y con ayuda de un bucle while en Python, se genera la sucesión de movimientos mencionada anteriormente, utilizando la variable de posición z , que al ir aumentando su valor, ira ejecutando una serie de comandos que permiten asignar una nueva posición a las partículas creadas en posiciones de z , estas últimas corresponden a cada una de las ubicaciones de los cuadrupolos creados al inicio de la simulación.

Al final, usando la herramienta matplotlib, se pretende generar una serie de gráficos que nos permitan hacer un análisis a los fenómenos observados en la secuencia de movimientos programada. Por último, con el objetivo de generar una simulación que permita una fácil interacción y un acceso sencillo a los resultados, se genero una interfaz gráfica más completa ver figura(5-9).

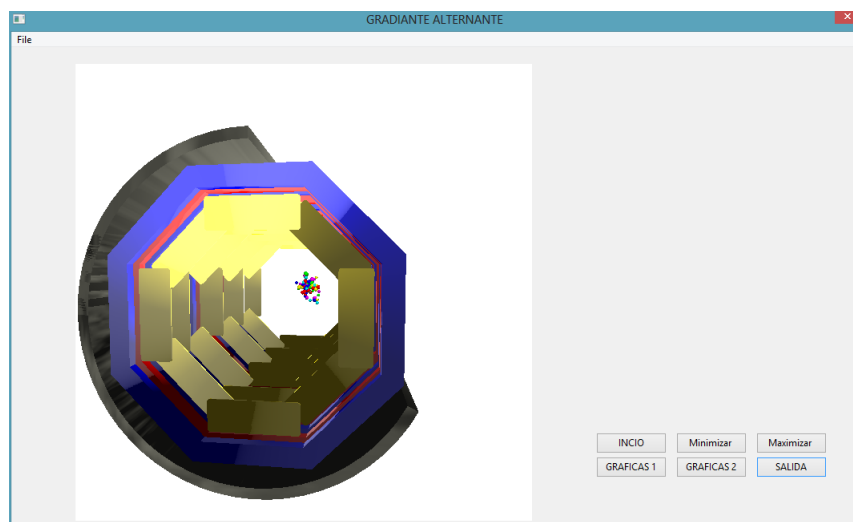


Figura 5-9: Imagen final de la interfaz gráfica de la simulación

5.3.1. Validación

En las primeras etapas de la simulación se obtienen una serie de datos, que muestran una concordancia con los aspectos teóricos evaluados en el capítulo 2. A continuación se exponen las correlaciones entre el resultado teórico de la figura (3-5) y las gráficas obtenidas en la simulación, lo cual muestran una relación correcta con el sistema real. Por esta razón, se considera que la simulación por el momento, corresponde con las intenciones de este proyecto y cuenta con un buen nivel de validez.

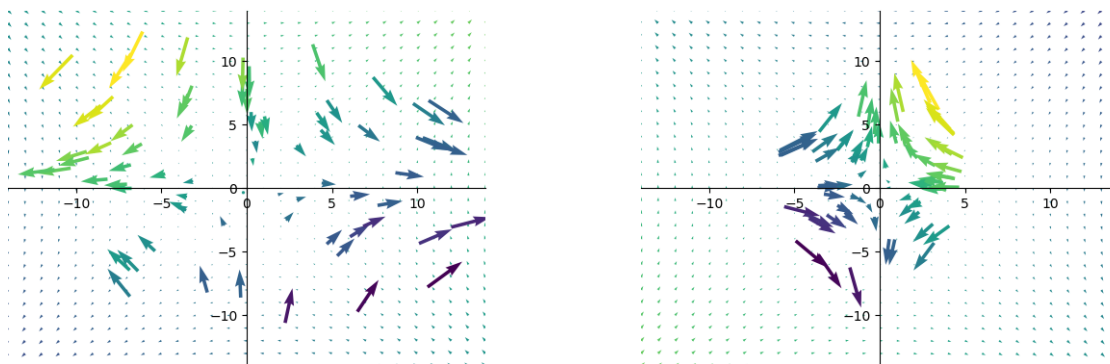


Figura 5-10: simulación de las fuerzas que experimentan partículas cargadas en diferentes posiciones en el interior de un cuadrupolo normal y rotado.

5.4. Planeación estratégica y táctica

Con la intención de comprobar si nuestra simulación logra mostrar las características y resultados de la aplicación del gradiente alternante en un acelerador de partículas circular, se planeo un experimento que consiste en:

1. Establecer un número de partículas fijo.
2. Establecer una lista de posiciones aleatorias.
3. Configurar una serie de imanes establecidos estratégicamente.

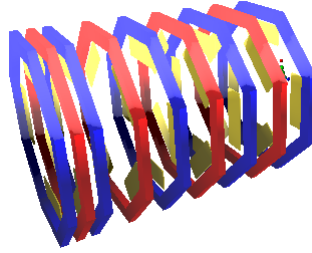


Figura 5-11: Arreglo de cuadrupolos normales y rotados.

Los imanes azules describen aquellos cuádrupolos enfocantes (MQF) y los imanes rojos los desenfocantes (MQD), configurando así un arreglo de imanes (MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF), para un total de 9 elementos, las partículas viajan de derecha a izquierda, según la figura (5-11), del primer elemento hasta el siete, la separación entre imanes será igual, $L = 4$, manteniendo un gradiente de campo de la mitad de la separación de los imanes (2), del elemento 7 al 8 y del 8 al 9, la separación será $\frac{1}{2}$ de la separación de los otros elementos.

4. Ejecutar la simulación.
5. A partir de los datos obtenidos del paso de las partículas por cada uno de los elementos, se procede hacer la gráfica de los siguientes datos:
 - a) (x, x')
 - b) (y, y')
 - c) (x, y)
 - d) Campo de fuerzas producido por los elementos magnéticos.
6. Ejecutar el paso 1 el número de veces necesarias.

5.4.1. Experimentación

Durante el desarrollo de esta etapa, el objetivo es hacer uso de las ecuaciones desarrolladas en los capítulos anteriores en conjunción con las constantes fijadas en la etapa de preparación de datos y junto con los scripts programados en python, lograr configurar un experimento con condiciones iniciales conocidas, las cuales estarán orientados por los siguientes pasos:

- Paso 1 y 2: Se establecieron un número total de setenta (70) partículas y el programa las configura en posiciones aleatorias de acuerdo a una distribución gaussiana.



Figura 5-12: Configuración de los pasos 1 y 2.

- Paso 3: se establece la secuencia acordada, (MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF)-(MQD)-(MQF), y los valores de separación y gradiente de campo se mantienen.

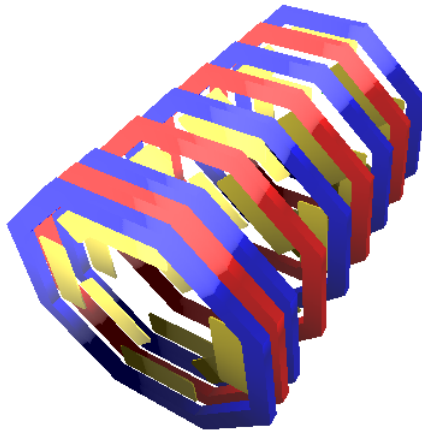


Figura 5-13: Configuración de los arreglos de (MQF) y (MQD)

- Paso 4: Ejecución de la simulación:

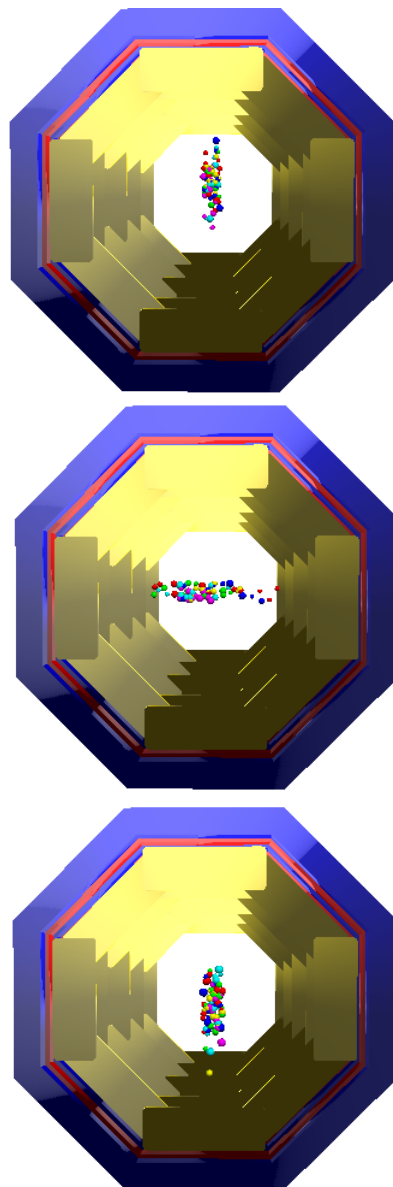


Figura 5-14: diferentes momentos de la ejecución de la simulación.

- Paso 5: graficación de los datos obtenidos:

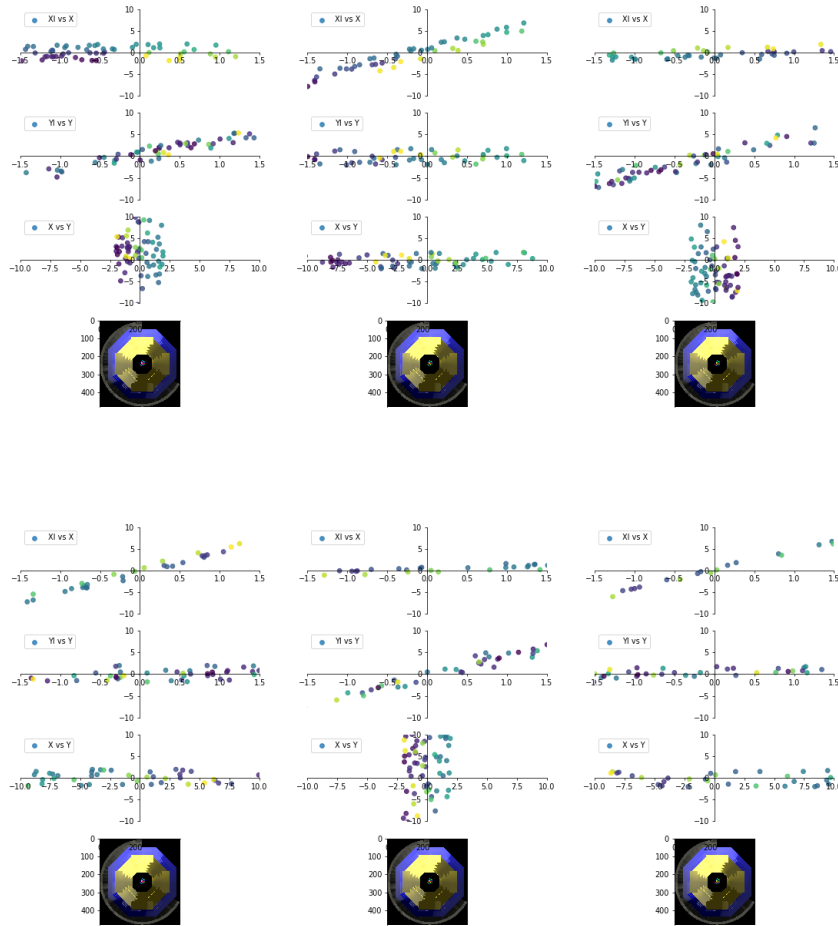


Figura 5-15: Espacios de fase (x, x') , (y, y') del haz al atravesar los diferentes elementos magnéticos simulados.

5.4.2. Interpretación

- Los resultados de las gráficas nos muestran que el haz cada vez que atraviesa un elemento magnético, su respectivo espacio de fases describe una elipse, en donde su área es invariante, es decir, mantiene su misma luminosidad.
- Durante el recorrido por la línea de transporte, se evidencia un haz estable por medio del uso de un arreglo de cuadrupolos normales y rotados.
- En los diagramas (x, y) se observa un haz compacto durante el recorrido por la red óptica del acelerador.

6 Conclusiones

6.1. Conclusiones

- Según los resultados encontrados en la deducción de la ecuación de movimiento transversal del haz se concluyó que los fundamentos teóricos que permiten su planteamiento y desarrollo corresponde con aquellos conceptos abordados en los cursos de física mecánica, electromagnetismo, relatividad y óptica geometría pertenecientes al plan de estudios de la licenciatura en física. Se recomiendan abordar más conceptos fundamentales de la física de aceleradores, por ejemplo, el movimiento longitudinal del haz con el fin de seguir evaluando el uso de los cursos de la licenciatura para la deducción de los conceptos de este tópico moderno de la física.
- Se determinó que el uso de sistemas computaciones digitales para la creación de simulaciones, puede llegar a convertirse en una potente herramienta a la hora de abordar situaciones experimentales en las áreas de física y carreras afines, siempre y cuando el desarrollo del modelo usado en la simulación cumpla con los requisitos que exige la situación experimental, es decir que de llegar a lograr desarrollar con éxito este modelo, esta herramienta computacional logrará llevar a las aulas de clases situaciones experimentales no sensibles, ni perceptibles a los estudiantes, permitiendo generar un aprendizaje situado logrando de esta manera incentivar la investigación y desarrollo de nuevas herramientas científicas.
- Este acercamiento inicial al concepto de gradiente alternante abre la posibilidad de diseñar nuevos ambientes virtuales para el proceso de enseñanza -aprendizaje de la física de aceleradores. De lograr configurar estos espacios, la simulación computacional de este trabajo monográfico logrará optimizar el aprendizaje situado con la ayuda de otros recursos didácticos tales como las analogías, animaciones, los objetos virtuales de aprendizaje, entre otros.
- Por último, resaltamos que el uso de una simulación computacional puede ser una herramienta tangible que permita acercar a los estudiantes de licenciatura en física o afines al concepto de gradiente alternante, esto debido a los beneficios que brinda los entornos gráficos y la manipulación de parámetros para la visualización de los efectos producidos por un arreglo de cuadrupolos magnéticos para mantener estable un haz durante el comisionamiento de un acelerador. Así mismo, los resultados obtenidos en

los diagramas de fase para cada uno de los elementos magnéticos corresponde con aquellos diagramas que predice la teoría y permiten comprender a su vez el concepto de emitancia en física de aceleradores.

Bibliografía

- [1] F. Díaz. Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 5(2), 2003.
- [2] F. Díaz and G. Hernández. *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo. Una interpretación constructivista (2^a. ed.)*. México: McGraw Hill., 2002.
- [3] J. Dewey. *Experience Education*. Nueva York: Simon Schuster, 1938/1997.
- [4] G. Amaya. La simulación computarizada como instrumento del método en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la física, desde la cognición situada: Ley de ohm. *Revista Actualidades Educativas en Educación*, 8(1):1–31, 2008.
- [5] K. Wille. *The Physics of Particle Accelerators*. Oxford University Press, 2000.
- [6] S. Y. Lee. *Accelerator Physics*. World scientific edition, 1999.
- [7] O. J. Camargo. Una propuesta didáctica mediada por las tic para la enseñanza de los conceptos básicos en física de aceleradores aplicados en el lhc, Universidad Pedagógica Nacional, 2017.
- [8] R. Macek. Report of the working group on electron-cloud effects. *ICFA Beam Dynamic Mini-Workshop on Beam Induced Pressure Rise at BNL*, 2000.
- [9] F. Hinterberge. *Electrostatic accelerators*. Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik, 2000.
- [10] M. S. Livingston and J. P. Blewett. *Particle Accelerator*. Macgraw hill edition, 1962.
- [11] D.A. Edwards and M.J. Syphers. *An introduction to the physics of High energy Accelerators*. Wiley, N.Y., 1993.
- [12] U. Amaldi. The importance of particle accelerators. *In Proceedings of 7th European Particle Accelerator Conference*, 2000.
- [13] P. Chen. Quantum aspects in beam physics-where is the \hbar . *ICFA Beam Dynamics Newsletter*, (12).
- [14] S. Humphries. *Principles of Charged Particle Accelerator*. Department of Electrical and Computer Engineering, 1986.
- [15] H. Wiedermann. *Particle Accelerator Physics*. Third edition, 2007.
- [16] F. Sannibale. *Fundamentals Accelerator physics and technology*. simulations and Mea-

- surement Lab, university of new mexico, June 16-17 1996.
- [17] R.E. Shannon. *Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación*. Trillas, México, 1988.
 - [18] Banks J., Carson J.S., and Nelson B.L. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
 - [19] E.E. Tarifa. *Teoría de modelos y simulación*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Jujuy, 2001.
 - [20] F. L. Van Rossum, G. and Drake Jr. Tutorial python, 2008.