



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

Extensión del modelo ESRF-EBS al diseño del
sincrotrón mexicano

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS ÁREA
TERMINAL EN FÍSICA

PRESENTA:

HARIM JOSAFAT VILLARREAL MIRANDA



TUTOR:

DR. ARMANDO ANTILLÓN DÍAZ

CUERNAVACA, MORELOS, 2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al equipo de trabajo del proyecto Sincrotrón Mexicano, en especial al Dr. Edgar Andrés Sánchez García, su apoyo y colaboración ha sido fundamental para la culminación de esta tesis. También agradezco a mi asesor, el Dr. Armando Antillón Díaz, cuya guía ha sido un pilar esencial en mi viaje académico.

Investigación realizada gracias al programa UNAM-PAPIIT IN108522. Proyecto apoyado por el “CONACYT” en el año 2023, con número CF-2023-I-119. Se agradece con el ICF por su hospitalidad y los recursos otorgados para realizar esta tesis.

Dedicatoria

A mis queridos padres, Francisco y Vianey, quienes con su apoyo incondicional y grandes enseñanzas, me han guiado en la vida.

A mi querida esposa, Melani, tu paciencia y apoyo han sido esenciales. Gracias por acompañarme en cada desafío y por celebrar a mi lado cada logro alcanzado. Tu presencia ha sido mi refugio constante y tu respaldo, mi mayor motivación.

Con gratitud y amor,

Harim J. Villarreal

Índice general

Agradecimientos	1
Dedicatoria	I
Índice de figuras	4
Resumen	12
1. Introducción	14
2. Breve reseña de las fuentes de luz sincrotrón	16
2.1. Generaciones de fuentes de luz sincrotrón	16
2.2. Descripción del sincrotrón europeo (ESRF-EBS)	19
2.3. Panorama actual de las fuentes de luz sincrotrón	21
2.3.1. SKIF	22
2.3.2. HEPS	24
3. Proyecto: fuente de luz mexicana	26
4. Consideraciones teóricas de la dinámica de partículas en un acelerador	28
4.1. Sistema de referencia	28
4.2. Ecuaciones de movimiento	29
4.3. Formalismo matricial de la dinámica lineal	30
4.3.1. Espacio libre	31
4.3.2. Cuadrupolo magnético	32

4.3.3. Dipolo magnético	32
4.3.4. Parámetros de Courant-Snyder	33
4.3.5. Aspectos de la dinámica de partículas en el espacio fase y emitancia.	34
4.3.6. Función de dispersión	35
4.3.7. Emitancia natural	36
4.3.8. Cromaticidad natural	37
4.3.9. Tonos de betatrón	37
4.3.10. Corrección cromática	38
5. Herramientas de cómputo y métodos de optimización que se usan en esta tesis	39
5.1. OPA	39
5.1.1. Construcción del archivo de entrada en OPA	40
5.1.2. Características generales del programa OPA	41
5.2. Programa de optimización de la celda en MATLAB.	42
6. Resultados	44
6.1. Reproducción de la celda ESRF-EBS	46
6.1.1. Emulación de la celda original	46
6.1.2. ESRF-EBS con emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$	48
6.2. Modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS.	50
6.2.1. Modelo con la mitad de la circunferencia de ESRF-EBS, usando su celda original con emitancia de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$	50
6.2.2. Modelo con 363 m de circunferencia, 16 celdas con dipolos invertidos y emitancia de $115 \text{ pm} \cdot \text{rad}$	53
6.3. Modelos 9BA para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS	56
6.3.1. Modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$	56
6.3.2. Modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$	58

6.3.3. Modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de 75 $pm \cdot rad$ con dipolos invertidos	60
6.4. Modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas del ESRF-EBS con un súper imán en el centro.	62
6.4.1. Primera modificación del ESRF-EBS con emitancia de 192 $pm \cdot rad$. usando un súper-imán	63
6.4.2. Segunda modificación del ESRF-EBS con emitancia de 223 $pm \cdot rad$ usando un súper-imán	65
6.5. Recopilación de resultados de los modelos	67
7. Discusión y conclusiones	69
Bibliografía	71
A. Archivo de entrada de ESRF-EBS para OPA	75

Índice de figuras

2.1. Esquema del SSRP que contenía en su estructura 2 dipolos para cerrar la órbita de las partículas. Contaba con algunas líneas de experimentación con y sin wigglers.	17
2.2. Se muestra una celda DBA del ESRF con sus funciones ópticas lineales (β_x , β_z y η en azul, verde y rojo). La emitancia de este diseño es aproximadamente de $4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verde respectivamente.	18
2.3. Diseño de la ingeniería de un segmento de arco DBA (superior) y el nuevo HMBA (inferior).	19
2.4. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) del ESRF-EBS. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados por los cuadros de color rojo, azul y verde respectivamente, también se incluyen los octupolos en verde fuerte y correctores en negro. La función de dispersión tiene una escala menor a las de las funciones β , como se muestra en el eje vertical a la izquierda de la figura.	20
2.5. La figura muestra la apertura dinámica del ESRF-EBS para 3 casos: sin RF, RF encendida y RF encendida, más consideración de errores.	21

2.6.	Esquema que relaciona la emitancia con la circunferencia del anillo de distintos sincrotrones [1]. Los que están cerca de la línea azul son de tercera generación. La cuarta generación es dividida en las línea roja y azul claro, esta última representa las actualizaciones que se están desarrollando en la actualidad. En la imagen se agregó un punto para representar una posible propuesta para el sincrotrón mexicano.	22
2.7.	Funciones ópticas de la celda base del SKIF (izquierda), y celda base con un dipolo de alta intensidad incorporado en el centro (derecha) [2].	23
2.8.	Funciones ópticas del hybrid - 7BA de HEPS [3], la modificación en la celda se muestra en la figura, la línea punteada en la dispersión representa la celda con dipolos LGB y, sin LGB, las líneas sólidas.	24
2.9.	Apertura dinámica de HEPS [3] obtenida con una simulación de 1024 vueltas. 25	25
4.1.	Esquema del sistema de coordenadas curvilíneas para describir el movimiento de partículas dentro de un sincrotrón.	29
4.2.	Oscilación de betatrón generada alrededor de la órbita de diseño por los elementos magnéticos cuadrupolares.	31
5.1.	En la imagen se muestran los controladores que están en el módulo de óptica lineal en OPA.	41
5.2.	En la figura (a) se muestra el espacio fase del modelo DBA del ESRF a desviación de momento cero, generada en una simulación de partículas de 1024 vueltas al anillo. En la figura (b) se muestra la zona de estabilidad para partículas con diferente desviación de momento.	42
5.3.	Diagrama de flujo del programa usado en Matlab para la optimización lineal tomado de la Ref. [4].	43
5.4.	En la figura se muestra la evolución temporal de las soluciones de las funciones β y de la dispersión en la optimización para la reproducción del modelo ESRF-EBS. Las soluciones están ligadas a condiciones iniciales en los valores de las funciones beta y mediante el algoritmo se pretende conseguir simetría al lograr el mismo valor al final de la celda.	43

-
- 6.1. Esquema del desarrollo de los modelos que se estudian en este capítulo. Los modelos de los cuadros verdes se desarrollan en las secciones 6.1, los de cuadros azules en las secciones 6.2, los modelos de los cuadros naranjas se encuentran en las secciones 6.3, y los de cuadros rosas están los modelos que se desarrollan en las secciones 6.4. 45
- 6.2. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo replicado del ESRF-EBS de una emitancia de $137 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verde respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 25 mm del núcleo de hierro. 47
- 6.3. Comparación de la apertura dinámica del modelo de la emulación de la celda original del ESRF-EBS cuyas funciones están en la Fig. 6.2. En (a) se representa la apertura dinámica para desviación de momento $\delta p/p = -3\%$, en (b) la apertura dinámica para $\delta p/p = 0\%$ y en (c) la apertura dinámica para $\delta p/p = 3\%$ 48
- 6.4. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda con emitancia mínima de la emulación del ESRF-EBS, obtenida de OPA y una emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm del núcleo de hierro. 49
- 6.5. Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , para el modelo ESRF-EBS con emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 50
- 6.6. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para la celda original con mitad de circunferencia de la emulación del ESRF-EBS, obtenida con OPA y con emitancia de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 25 mm del núcleo de hierro. 52

-
- 6.7. Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , para el modelo con la mitad de la circunferencia de ESRF-EBS, usando su celda original con emitancia de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 53
- 6.8. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) del modelo con 363 m de circunferencia, 16 celdas con dipolos invertidos y emitancia de $115 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia 25 mm. 54
- 6.9. Apertura dinámica para una celda ESRF-EBS 7BA con antibends y longitud menor. La figura en (a) representa la apertura dinámica para desviación de momento $\delta p/p = -3\%$, en (b) la apertura dinámica para $\delta p/p = 0\%$ y (c) la apertura dinámica para $\delta p/p = 3\%$ 55
- 6.10. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm. 57
- 6.11. Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , en el modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 58
- 6.12. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm. 59
- 6.13. La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , para el modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 60

-
- 6.14. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ con dipolos invertidos. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm. 61
- 6.15. La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , del modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ con dipolos invertidos. 62
- 6.16. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) de la primera versión del ESRF-EBS con un imán de alta intensidad en el centro y emitancia es de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm. 64
- 6.17. La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , del modelo primera versión ESRF-EBS modificado con super-imán con emitancia de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 65
- 6.18. Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) de la segunda versión ESRF-EBS modificado con súper imán en el centro, con emitancia de $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de 25 mm. 66
- 6.19. La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , de la segunda versión ESRF-EBS modificado con superimán, de emitancia de $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 67

Glosario

brillantez Definida en [5] como la intensidad del haz de fotones dividida por su volumen en el espacio de fase. 15

DBA El double-bend achromat consiste en dos imanes dipolares que curvan la trayectoria del haz de electrones en una sección de arco. Entre los dipolos se ubican cuadrupolos que enfocan el haz. 18

HMBA El hybrid multi-bend achromat es una configuración de varios dipolos híbridos que curvan la trayectoria del haz de electrones en una sección de arco. Entre los dipolos se ubican cuadrupolos que enfocan el haz . 19

LGB El longitudinal gradient bend consiste en un dipolo con un campo magnético aumenta o disminuye a lo largo del imán. 20

MAX-IV Es un laboratorio nacional sueco de luz sincrotrón. 15

MBA El multi-bend achromat es una configuración de varios dipolos que curvan la trayectoria del haz de electrones en una sección de arco. Entre los dipolos se ubican cuadrupolos que enfocan el haz . 19

onduladores Consisten en una serie de imanes dipolares alternos que crean un campo magnético periódicamente variable [6]. 17

OPA Es una herramienta para el desarrollo de anillos de almacenamiento, con énfasis en la visualización e interactividad. 2, 39, 40, 41

RB El campo magnético del reverse bend desvía el haz de electrones en la dirección contraria a la de los imanes dipolares estándar. 44

SIRIUS Es la segunda fuente de luz de sincrotrón construida en Brasil. 15

SOLEIL Fuente de luz sincrotrón ubicada en Saint-Aubin, Francia. 50

TBA El triple-bend achromat es una configuración de tres imanes dipolares que curvan la trayectoria del haz de electrones en una sección de arco. Entre los dipolos se ubican cuadrupolos que enfocan el haz. 18

wigglers Es un dispositivo que consiste en una serie de imanes dipolares dispuestos en una secuencia alternante de polaridades opuestas. A medida que un haz de electrones pasa a través de este arreglo, experimenta una serie de oscilaciones forzadas, o zigzagueos, debido a los campos magnéticos [6]. 4, 17

Siglas

ALS-U Advanced Light Source - Upgrade. 56

APS Advanced Photon Source. 14

DLSR Diffraction-limited storage rings. 22

ESRF-EBS European Synchrotron Radiation Facility - Extreme Brilliance Source. 12

HEPS High Energy Photon Source. 15

SLAC Stanford Linear Accelerator Center. 16

SPEAR Stanford Positron Electron Accelerating Ring. 16

SSRP Stanford Synchrotron Radiation Project. 16

Resumen

Desde el inicio del proyecto del sincrotrón mexicano en la primera década de este siglo, se ha preparado un grupo de estudio dedicado a explorar alternativas para un modelo adecuado de fuente de luz sincrotrón como propuesta de diseño en caso de que se construya una instalación en el futuro. El grupo se ha enfocado en el desarrollo de métodos de cómputo para estudiar la dinámica lineal y no lineal de las partículas, lo que amplía el panorama de posibilidades al analizar un modelo determinado.

La presente tesis es uno de los resultados de este esfuerzo, en el que se busca extender la actualización del modelo europeo a una propuesta para el sincrotrón mexicano. El ESRF-EBS (*European Synchrotron Radiation Facility - Extreme Brilliance Source*) es la actualización del Laboratorio Europeo de Radiación Sincrotrón, localizado en el campus científico europeo de fotones y neutrones que está ubicado en Grenoble, Francia. Para comprender la relevancia del diseño del sincrotrón europeo en el panorama actual, en el Cap. 2 se exploran algunas características de las fuentes de luz, desde su inicio hasta la generación actual.

Desde el inicio del proyecto se ha tratado de inculcar la importancia de equipar a México con un laboratorio de este tipo a través de talleres. En el Cap. 3 se proporcionará más detalles sobre las actividades realizadas desde entonces hasta hoy en día.

Un estudio de los diseños requiere de un fundamento teórico de la física de aceleradores, que respalda los programas utilizados para realizar los cálculos relevantes a los diseños propuestos. Por ello, en el Cap. 4 se aborda la teoría considerada fundamental para comprender las herramientas de cómputo y los métodos de optimización que se muestran en el Cap. 5.

Para concluir, en el Cap. 6 se muestra en detalle los principales resultados obtenidos a

partir de la emulación del ESRF-EBS hasta las modificaciones que nos llevan a una propuesta para el sincrotrón mexicano. Estas modificaciones se han implementado tratando de cumplir las características de la cuarta generación de fuentes de luz sincrotrón.

Capítulo 1

Introducción

El campo de la física de aceleradores despierta una fascinación en la cultura que se refleja en las referencias de la ciencia ficción cinematográfica. En estas películas, se atribuye a los aceleradores y colisionadores, fenómenos de viajes entre dimensiones que incrementan el interés por ellos. Aunque los laboratorios dedicados a la física de aceleradores no pueden llevarnos a otras dimensiones ni crear agujeros negros, las investigaciones que se realizan dentro de sus instalaciones son igualmente impresionantes. En las fuentes de luz sincrotrón se realizan una variedad de experimentos que, en las últimas décadas, han sido de gran relevancia científica. Estos experimentos demuestran la versatilidad e importancia de los sincrotrones para la ciencia.

Las técnicas empleadas dentro de las fuentes de luz probablemente son más reconocidas que las propias instalaciones, debido al impacto significativo de sus aplicaciones en la ciencia. Un ejemplo es la cristalografía macromolecular, que ha sido esencial para analizar la estructura y las funciones de las proteínas, resaltando así la importancia de las fuentes de luz sincrotrón. Este reconocimiento se refleja en la concesión de Premios Nobel en Química a los autores de estos estudios. Un ejemplo notable es Brian Kobilka, profesor y catedrático de Fisiología Molecular y Celular en la Facultad de Medicina de Stanford, quien recibió el Premio Nobel de Química en 2012 por su investigación en la estructura y el funcionamiento de un complejo proteico en la superficie de las células humanas, realizada en el APS (Advanced Photon Source) [7].

Para lograr avances relevantes en la ciencia, es necesario que las fuentes de luz se mantengan a la vanguardia. Esto implica un aumento en la intensidad de la luz utilizada en los experimentos, lo que mejora notablemente la calidad de los resultados obtenidos en las líneas de investigación. Una brillantez mayor se vincula a una emitancia natural reducida, un aspecto crucial que se abordará de manera más detallada en capítulos posteriores.

El diseño de las fuentes de luz, así como las actualizaciones y nuevas implementaciones, son proyectos que requieren la colaboración de físicos, ingenieros, representantes del sector político, entre otros, para ser concretados. El primer aspecto que debe abordarse es el estudio teórico de las configuraciones de los elementos magnéticos que conforman el anillo de almacenamiento del haz de electrones. Este diseño conceptual debe considerar las limitaciones físicas de los materiales y la tecnología disponible, de modo que el diseño sea lo más cercano posible a lo técnicamente realizable.

Los diseños actuales se destacan por una secuencia más compleja de elementos magnéticos, que incluye un mayor número de dipolos por celda unitaria. Esto impone fuertes restricciones a las fuentes de luz que buscan actualizarse, una de ellas es la ubicación de los dipolos que alimentan ciertas líneas de experimentación. La actualización del sincrotrón europeo el 25 de agosto de 2020 [8] logró superar estas restricciones y lo posicionó como la primera fuente de luz de cuarta generación. El sincrotrón SIRIUS, HEPS, y MAX-IV se consideran como los siguientes en estar en la actual generación. Su innovación le proporciona una emitancia horizontal de aproximadamente de $150 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, que es aproximadamente 30 veces menor que la emitancia anterior, reutilizando el 90% de la infraestructura existente [9].

Este estudio se inspira en el éxito del ESRF-EBS y busca emular su esquema en el contexto del sincrotrón mexicano. Se han explorado posibles modelos aplicables y se ha evaluado la efectividad de la emulación del ESRF-EBS. Se muestran los resultados de las optimizaciones de la dinámica lineal, destacando la importancia del poder de cómputo y la precisión de los programas utilizados. Se espera que los modelos mostrados en esta tesis contribuyan significativamente al desarrollo de una fuente de luz en México.

Capítulo 2

Breve reseña de las fuentes de luz sincrotrón

2.1. Generaciones de fuentes de luz sincrotrón

Durante la década de 1960, se desarrolló la *primera generación* de fuentes de luz sincrotrón, en la que se utilizaron instalaciones de alta energía en funcionamiento para producir radiación sincrotrón como un subproducto parasitario. Un ejemplo es el SSRP (Stanford Synchrotron Radiation Project) [10], que se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) en California. En este proyecto, se aprovechó el anillo de almacenamiento del programa de colisión de haces de electrones y positrones SPEAR (Stanford Positron Electron Accelerating Ring) para generar radiación sincrotrón.

El proyecto SSRP fue fundado en 1973 y es considerado uno de los primeros ejemplos de una instalación dedicada a la investigación de la luz sincrotrón, que proporcionaba una amplia gama de radiación, desde el ultravioleta hasta rayos X duros. Desde entonces, ha sido una instalación activa, ofreciendo a los usuarios acceso a sus líneas experimentales. La instalación contaba con varias líneas de experimentación que permitían la obtención de radiación a través de dos dipolos, como se puede apreciar en el la Fig. 2.1, que es un esquema de 1997. A través de estas líneas, los investigadores podían estudiar una variedad

de fenómenos, como la estructura molecular de proteínas.

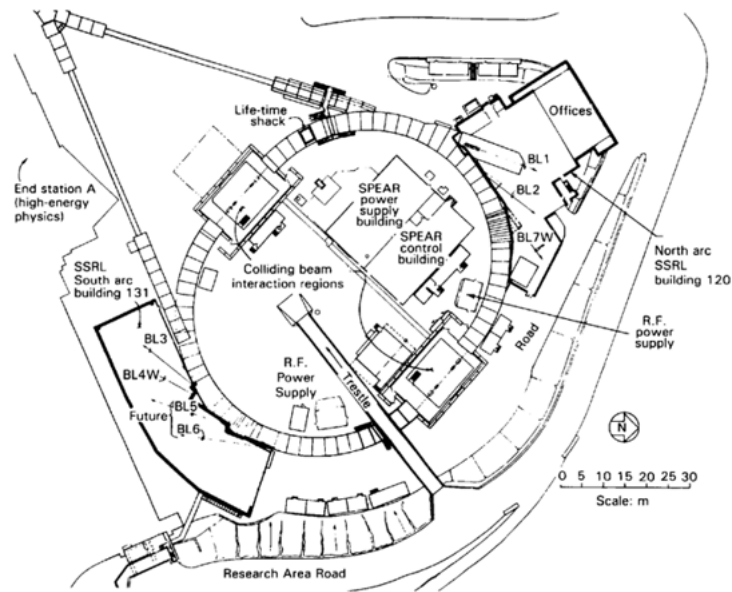


Figura 2.1: Esquema del SSRP que contenía en su estructura 2 dipolos para cerrar la órbita de las partículas. Contaba con algunas líneas de experimentación con y sin wigglers.

La limitación en la producción de radiación de sincrotrón usando instalaciones de altas energías se debía a la utilización de haces de partículas de baja corriente. Esto motivó el desarrollo de instalaciones dedicadas exclusivamente a la producción de luz sincrotrón, lo que dio lugar a su *segunda generación*. En esta generación, se construyeron instalaciones dedicadas para la producción de radiación de sincrotrón, como el SPEAR [11], que fue convertido completamente en una fuente de luz sincrotrón en 1992.

Una ventaja de estas fuentes dedicadas es que permiten el uso de haces de partículas de alta corriente, lo que aumenta la producción de radiación de sincrotrón. Además, la calidad de la radiación producida también mejoró gracias al desarrollo de nuevos métodos de ingeniería y tecnología en los imanes utilizados para guiar los haces de partículas. Un ejemplo notable de esta evolución son los onduladores, los cuales fueron incorporados por primera vez en algunos sincrotrones de segunda generación.

Las fuentes de luz de *tercera generación* incorporaron mejoras significativas en su diseño en comparación con las fuentes de segunda generación. La adición de largas secciones rectas para los dispositivos de inserción son una de las características principales de estas fuen-

tes de luz. Los dispositivos de inserción son arreglos de dipolos magnéticos con polaridad alternante, orientados verticalmente y muy cercanos entre sí. Esto provoca que la trayectoria del haz oscile horizontalmente, generando un efecto de interferencia constructiva en la radiación y aumentando su brillo. Esta implementación permitió a los usuarios de luz sincrotrón obtener información más detallada y precisa de la muestra en estudio.

Adicionalmente, en la tercera generación los diseños seguían una tendencia a modelos TBA (triple-bend achromat) y DBA (double-bend achromat) [1], que proporcionaban una emitancia en el intervalo de nanómetros. Por ejemplo, en la primera etapa del ESRF se construyó un sincrotrón de tercera generación con un diseño de celda DBA y una emitancia de $4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. Su celda se muestra en la Fig. 2.2 en la que los elementos magnéticos, representados por rectángulos, son responsables de las formas de las funciones β y η . En el siguiente capítulo se introducen características generales de la generación actual y en particular sobre el ESRF-EBS.

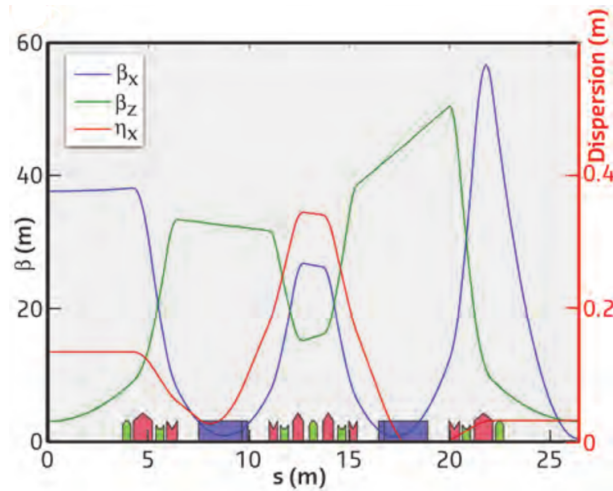


Figura 2.2: Se muestra una celda DBA del ESRF con sus funciones ópticas lineales (β_x , β_z y η en azul, verde y rojo). La emitancia de este diseño es aproximadamente de $4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verde respectivamente.

2.2. Descripción del sincrotrón europeo (ESRF-EBS)

En la *cuarta generación* de fuentes de luz sincrotrón, se hace énfasis en la minimización de la emitancia mediante la implementación de arreglos de imanes MBA (Multibend achromat), lo que aumenta el número de dipolos por celda y, por lo tanto, la fuerza de enfoque de los cuadrupolos. En el caso del ESRF-EBS, su actualización requiere sustituir los 32 arcos que componen el anillo por un nuevo arreglo de imanes (Fig. 2.3).

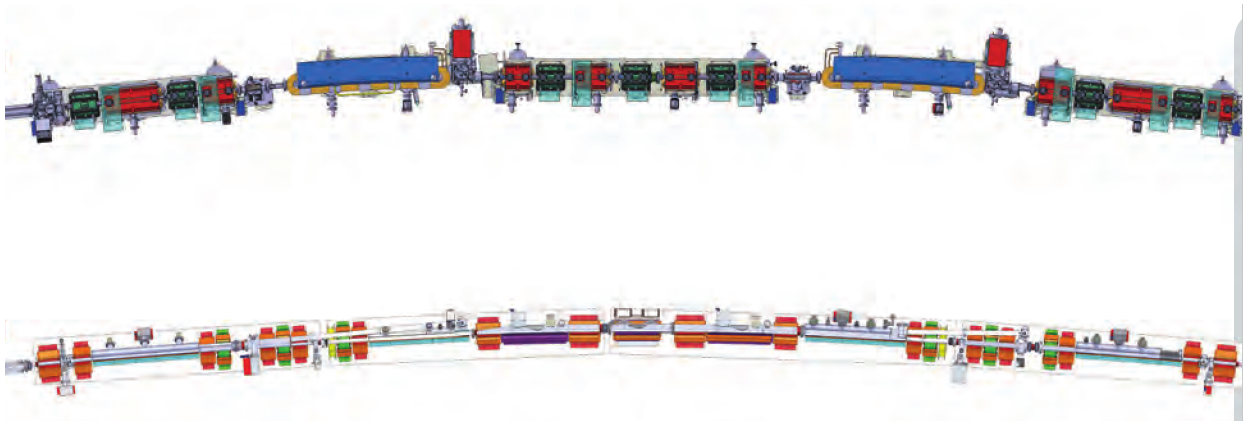


Figura 2.3: Diseño de la ingeniería de un segmento de arco DBA (superior) y el nuevo HMBA (inferior).

La celda magnética que se desarrolló para la actualización es conocida como HMBA (Hybrid multi-bend achromat), que es una variante del MBA, que resuelve el problema de la corrección cromática localmente en cada celda. Se incrementó el número de dipolos de dos a siete, en un arreglo de 23.4 m, y por ello se considera un modelo tipo 7BA. El diseño de este modelo también tiene como propósito disminuir la emitancia al aumentar el número de dipolos por celda como se muestra en la Fig. 2.4 en donde los dipolos son representados por rectángulos azules.

La nueva actualización cuenta con una emitancia de $147 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ (Tab. 2.1). El anillo está compuesto por 30 celdas idénticas y dos celdas modificadas para lograr inyección.

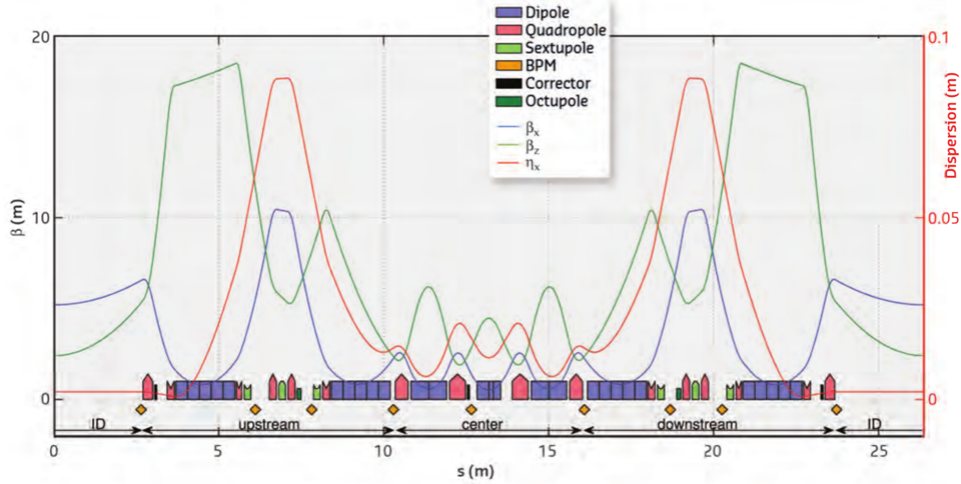


Figura 2.4: Funciones β_x, β_y y η (azul, rojo y verde) del ESRF-EBS. Los cuadrupolos, dipolos y setupolos son representados por los cuadros de color rojo, azul y verde respectivamente, también se incluyen los octupolos en verde fuerte y correctores en negro. La función de dispersión tiene una escala menor a las de las funciones β , como se muestra en el eje vertical a la izquierda de la figura.

Energy [GeV]	6
Circunferencia [m]	843.979
Natural Emittance [$pm \cdot rad$]	147
Betatron tunes (Q_x, Q_y)	(75.6, 27.6)
Momentum compaction factor	0.97×10^{-4}

Cuadro 2.1: Algunos parámetros importantes del modelos ESRF-EBS obtenidos del ESRF Orange book [12]

Para lograr un diseño 7BA-HMBA, es fundamental cumplir con cuatro puntos. En primer lugar, la sección central de la celda requiere de cuadrupolos con fuerte enfoque horizontal y dipolos combinados con gradientes de enfoque vertical para minimizar la emitancia y la longitud de la celda. En segundo lugar, se necesita crear un pico de dispersión entre el primer y segundo dipolo LGB (Longitudinal gradient bending). Manteniendo la simetría se generará otro pico entre el sexto y el séptimo dipolo. En estas regiones de alta dispersión se colocan los sextupolos que corrigen la cromaticidad natural.

El tercer punto es una condición en el avance de fase, que entre cada par de sextupolos se debe de cumplir que la diferencia del avance de fase debe de ser un múltiplo impar de π . De esta manera se elimina la mayoría de los efectos no deseados generados por los sextupolos en la dinámica no lineal. La apertura dinámica resultante en el ESRF-EBS se muestra en la Fig. 2.5, donde se realizó una simulación de partículas a lo largo de 512 vueltas. Cada curva representa una simulación hecha con y sin RF (radio frequency). Las líneas rojas indican diferentes márgenes de error aceptados para los elementos magnéticos. El cuarto punto es diseñar los dipolos LGB con un campo que disminuya conforme se acerque al pico de dispersión, esto aumenta la dispersión en esta región y disminuye aún más la emitancia [3].

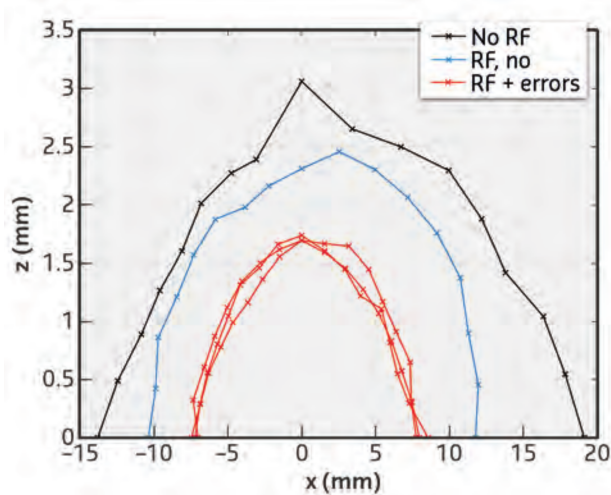


Figura 2.5: La figura muestra la apertura dinámica del ESRF-EBS para 3 casos: sin RF, RF encendida y RF encendida, más consideración de errores.

2.3. Panorama actual de las fuentes de luz sincrotrón

Las fuentes de luz modernas se desarrollan con el propósito de incrementar su capacidad para producir una radiación intensa y altamente colimada, en un espectro de frecuencias que abarca desde rayos X hasta el infrarrojo. La radiación producida por la *cuarta generación* de fuentes de luz tiene una brillantez mayor, uno o dos órdenes de magnitud, en

comparación con la generación que le precede. Esta generación también es llamada DLSR (diffraction-limited storage rings) debido a que la emitancia se aproxima al límite de difracción de la luz producida. Esta característica se logra con diseños de baja emitancia, en que las celdas tipo MBA se consideran fundamentales para actualizaciones de fuentes de luz que contemplan transitar a la nueva generación.

En la Fig. 2.6 se muestra una gráfica en la que los sincrotrones de tercera generación están aglomerados en la línea azul marino, y los que están colocados en la línea roja y azul cielo están en la nueva generación. En las siguientes subsecciones se hablará más a detalle sobre algunas características de la nueva generación.

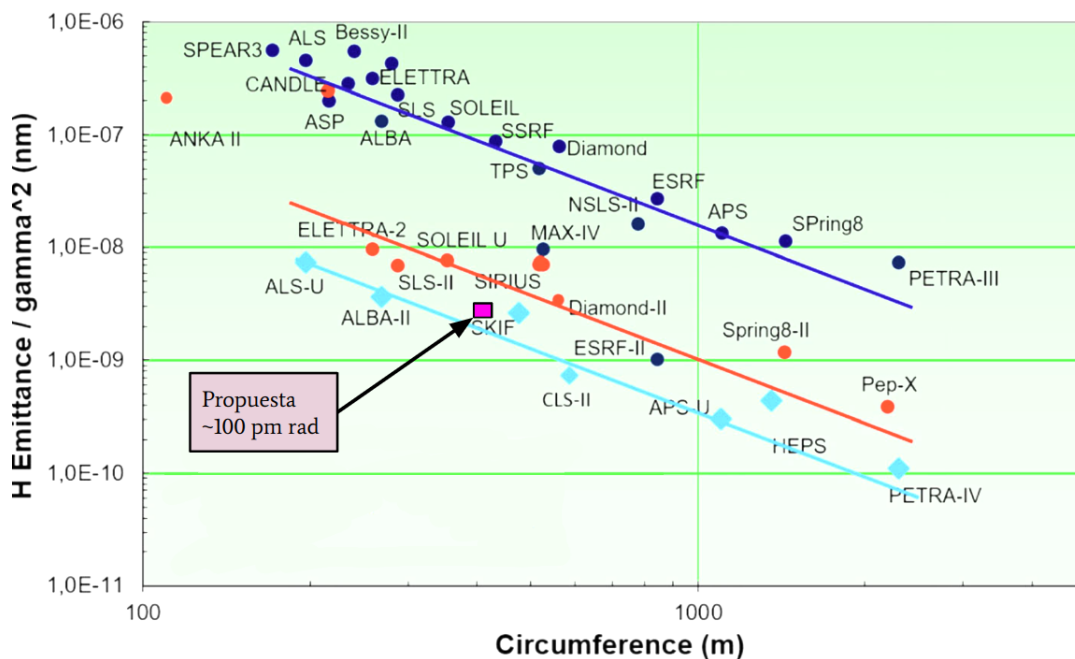


Figura 2.6: Esquema que relaciona la emitancia con la circunferencia del anillo de distintos sincrotrones [1]. Los que están cerca de la línea azul son de tercera generación. La cuarta generación es dividida en las línea roja y azul claro, esta última representa las actualizaciones que se están desarrollando en la actualidad. En la imagen se agregó un punto para representar una posible propuesta para el sincrotrón mexicano.

2.3.1. SKIF

En Novosibirsk Oblast, Rusia, está en construcción el proyecto de fuente de luz sincrotrón llamado SKIF [2] del acrónimo ruso de Siberian Circular Photon Source, que se planea

finalizar en el 2024 [13]. El diseño cuenta con 3 GeV de energía, una circunferencia de 476.14 m y una emitancia de $76 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, por lo que las características de este diseño son similares a las propuestas para la fuente de luz mexicana.

El TME (theoretical minimum emittance) es el método utilizado en el diseño del sincrotrón ruso, que considera tener la siguiente configuración para la beta horizontal β_x y para función de dispersión η

$$\beta_{x,min} = \frac{L}{\sqrt{15}} \quad \text{y} \quad \eta_{min} = \frac{L\varphi}{6}, \quad (2.1)$$

teniendo un dipolo de longitud $2L$ con un ángulo de desviación de 2φ .

Las condiciones anteriores se consiguen cuando se minimiza el factor F que depende de la celda y es dado por la siguiente ecuación

$$\epsilon_x = F \frac{C_q \gamma^2}{J_x} (2\varphi)^3, \quad (2.2)$$

en donde $\gamma \gg 1$ es el factor de Lorentz, $J_x \approx 1/2$ es el número de amortiguación horizontal y $C_q = 3,84 \times 10^{-13} \text{ m}$.

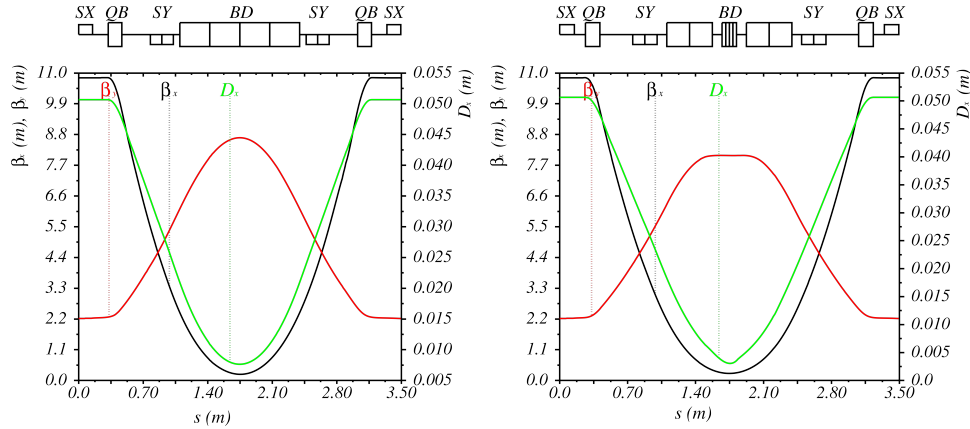


Figura 2.7: Funciones ópticas de la celda base del SKIF (izquierda), y celda base con un dipolo de alta intensidad incorporado en el centro (derecha) [2].

En la Fig. 2.7 se muestra la celda base que se utiliza para construir un superperíodo (un $1/16$ del anillo) de SKIF, que es tipo 7BA de 30 metros aproximadamente.

2.3.2. HEPS

El HEPS comenzó su construcción en junio de 2019 [14] en Beijing, lo que lo coloca como una de las más recientes fuentes de luz sincrotrón. Será la primera en China, con un tamaño de 1296 m de circunferencia y una energía de 6 GeV; el diseño estima que tenga una emitancia por debajo de los $60 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Decidieron desarrollar una celda tipo ESRF-EBS, a la que llamaron *hybrid - 7BA* con una longitud de 26.992 m semejante a la actualización del sincrotrón europeo. En la Fig. 2.8 se muestra las funciones lineales de la *hybrid - 7BA*, las cuales cumplen con una geometría similar a las mostradas por la actualización del sincrotrón europeo. Este es un buen ejemplo de las aplicaciones del diseño europeo a nuevas fuentes de luz.

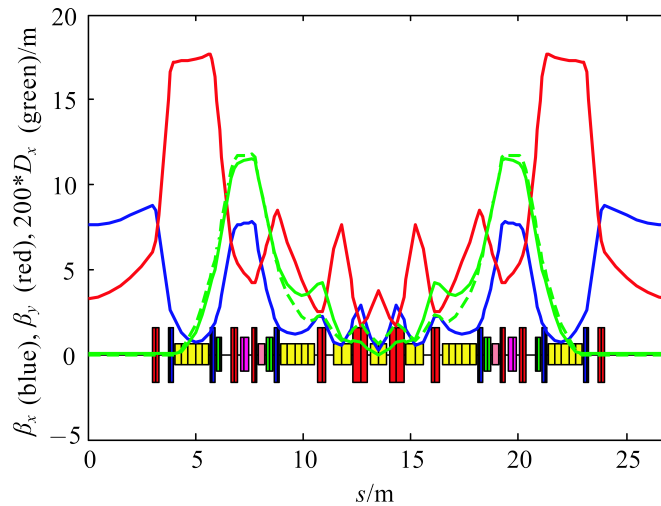


Figura 2.8: Funciones ópticas del *hybrid - 7BA* de HEPS [3], la modificación en la celda se muestra en la figura, la línea punteada en la dispersión representa la celda con dipolos LGB y, sin LGB, las líneas sólidas.

El resultado más relevante de la optimización no lineal de este modelo, es su apertura dinámica de aproximadamente 6 mm a desviación momento cero, que se muestra en la Fig. 2.9.

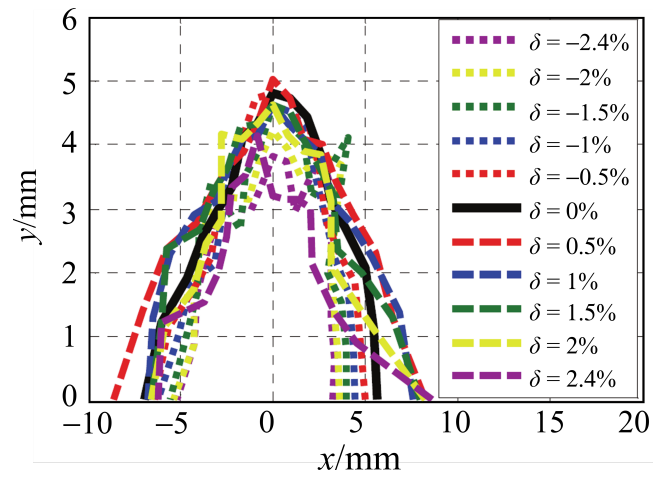


Figura 2.9: Apertura dinámica de HEPS [3] obtenida con una simulación de 1024 vueltas.

Capítulo 3

Proyecto: fuente de luz mexicana

El camino hacia la construcción de un sincrotrón en México ha presentado grandes retos, desde aspectos científicos hasta lo político. En este capítulo se hace una revisión de los avances tecnológicos y científicos que se han hecho para acompañar el proyecto de fuente de luz sincrotrón mexicana [15] hasta su estado actual.

La idea de construir un sincrotrón en México se concibe a principios de la década del 2000, por el doctor Matías Moreno, quien era el director del Instituto de Física de la UNAM. Dentro de megaproyectos convocados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), se incluye el primer proyecto orientado a una fuente de luz sincrotrón, dentro del cual se organiza el primer Taller Mexicano sobre Física de Aceleradores, en este se propone que el diseño de la fuente de luz sea de segunda generación.

Los megaproyectos tenían un límite presupuestal, lo que limitaba la inclusión de tecnología al diseño propuesto, como los dispositivos de inserción, y que la circunferencia de alrededor 100 m. En pocas palabras, el proyecto no obtuvo el financiamiento, pero con este proceso se sentaron las bases para la conformación de un grupo de investigadores.

La segunda intento de tener un proyecto comenzó en el 2009, cuando nace el interés de la Dirección Adjunta de Desarrollo Científico (DADC) de Conacyt por el funcionamiento y uso de los aceleradores. Se convocó a un grupo de usuarios de aceleradores que, dentro de sus conclusiones, destacan a las fuentes de luz sincrotrón por sus aplicaciones a la ciencia pura y al desarrollo tecnológico.

Esto hizo que el director de la DADC, en aquel momento, el doctor José Antonio de la Peña, propusiese una visita al sincrotrón español ALBA. La visita se realizó en junio del 2010 y logró un convencimiento en la DADC de que la construcción de una fuente de luz sincrotrón era necesaria y posible para el país. El segundo Taller Mexicano de Física de Aceleradores se llevó a cabo en noviembre del 2010, en donde se realizó un compromiso con la DADC para impulsar la construcción de una fuente de luz sincrotrón en México. De este compromiso, en 2011 se realizó un proyecto en el que se definieron los alcances y requerimientos generales que tendría la fuente de luz sincrotrón mexicana. Sin embargo, en esta etapa el proyecto se detuvo por diferentes razones que podrían estar ligadas al cambio de sexenio y de los administrativos a cargo.

En su tercera etapa, el proyecto fue impulsado por el estado de Morelos y el objetivo del proyecto era realizar un *“Plan Estratégico para la Construcción y Operación de un Sincrotrón en Morelos”* que inició en el 2014 y concluyó en el 2016.

En esta etapa se resalta la realización del III Taller Mexicano de Física de Aceleradores y el desarrollo de un diseño conceptual para el sincrotrón mexicano a partir de diseños tipo ALBA, ALS II (Advanced Light Source) y MAX IV, que se adecuaron a una circunferencia de alrededor de los 400 metros y 3 GeV.

Las modelos anteriores estaban diseñadas en base a fuentes de luz sincrotrón de tercera generación, y sus esquemas y características están detallados en la tesis de N. Méndez [16]. En abril del 2019 se solicitó a la Cámara de Diputados y Secretaría de Hacienda y Crédito Público, por parte del Estado de Hidalgo, un presupuesto para la construcción y operación del proyecto sincrotrón. Sin embargo, los avances políticos para la construcción no se concretaron.

Capítulo 4

Consideraciones teóricas de la dinámica de partículas en un acelerador

En este capítulo se abordará brevemente la teoría alrededor de la dinámica lineal en sincrotrones. La dinámica de los electrones en un sincrotrón se basa en la aceleración de los electrones a través de cavidades de radiofrecuencia hasta que alcanzan una energía relativista. Una vez que las partículas son inyectadas en el anillo de almacenamiento, su órbita debe ser mantenida mediante arreglos de imanes dipolares y cuadrupolares que curvan y enfocan la trayectoria del paquete de partículas. Estos procesos definen la dinámica lineal en el anillo de almacenamiento y es crucial para el correcto funcionamiento del sincrotrón. La dinámica lineal es el estudio de cómo las partículas cargadas interactúan con campos electromagnéticos en un sistema lineal. Los imanes dipolares y cuadrupolares juegan un papel clave en la dinámica lineal al curvar y enfocar la trayectoria del haz de partículas.

4.1. Sistema de referencia

La dinámica lineal de un sincrotrón, se determina sobre un sistema de referencia que se mueve con la partícula de referencia a lo largo de la órbita s . Este sistema se conoce

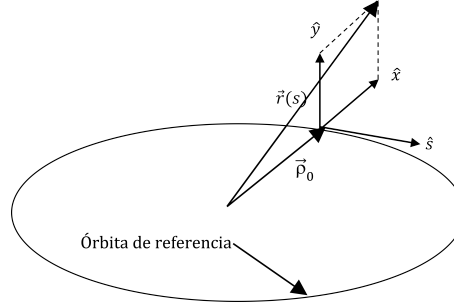


Figura 4.1: Esquema del sistema de coordenadas curvilíneas para describir el movimiento de partículas dentro de un sincrotrón.

como el sistema de coordenadas de Frenet-Serret, y se describe en la literatura científica [5]. El radio de curvatura se define como $\rho(s)$ y los vectores unitarios que forman la base ortonormal se definen de la siguiente manera: \hat{s} apunta en la dirección de la trayectoria de la partícula, \hat{x} es vector unitario de la componente horizontal y \hat{y} es el vector unitario de la componente vertical, como se muestra en la Fig. 4.1.

$$\hat{s}(s) = \frac{d\vec{\rho}_0(s)}{ds} \quad (4.1)$$

$$\hat{x}(s) = -\rho(s) \frac{d\hat{s}(s)}{ds} \quad (4.2)$$

$$\hat{y}(s) = \hat{x}(s) \times \hat{s}(s) \quad (4.3)$$

La trayectoria de la partícula alrededor de la órbita de referencia puede ser descrita en término de los vectores unitarios [5]

$$\vec{r}(s) = \vec{\rho}_0(s) + x\hat{x}(s) + y\hat{y}(s) \quad (4.4)$$

4.2. Ecuaciones de movimiento

La dinámica del electrón en la órbita de referencia está determinada por la fuerza de Lorentz Ec. (4.5). En este caso, sólo se tendrá en cuenta la fuerza magnética en la ecuación, ya que es la responsable del movimiento transversal de la partícula, mientras que el campo eléctrico se encarga de la aceleración de las partículas.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (4.5)$$

Para mantener la partícula cerca de la órbita definida, se utiliza el esquema de enfoque fuerte [17], en el cual los cuadrupolos generan una fuerza de enfoque que da como resultado una dinámica lineal en el sistema coordenado. Las Ecs. (4.6) y (4.7) se conocen como ecuaciones de betatrón, que describen el movimiento de la partícula en el plano transversal. En la Fig. 4.2 se puede observar la trayectoria de la partícula bajo la acción de estas ecuaciones. Las ecuaciones de betatrón contienen el gradiente de campo de los cuadrupolos y el radio de curvatura ρ generado por los dipolos, y permiten controlar la posición y el tamaño de la órbita de la partícula.

$$x'' + \left[\frac{1}{\rho^2} + b_2(s) \right] x = 0 \quad (4.6)$$

$$y'' - b_2(s)y = 0 \quad (4.7)$$

en donde $(B\rho) = p_0/e$ se define como la rigidez del haz, p_0 es el momento de la partícula de referencia y

$$b_2(s) = \frac{1}{(B\rho)} \frac{\partial B_y(s)}{\partial x} \quad (4.8)$$

es la función de enfoque efectiva.

4.3. Formalismo matricial de la dinámica lineal

La matriz de transferencia de una sección de elementos magnéticos puede describir el comportamiento de las partículas que pasan por ella. Esta matriz puede ser representada como una matriz de 2×2 que relaciona las coordenadas de posición y ángulo de una partícula antes y después de pasar por la sección de elementos magnéticos. Los elementos magnéticos comúnmente utilizados son los electroimanes, los cuales se componen de un núcleo de hierro y una bobina de alambre que envuelve el imán, aumentando el campo magnético generado.

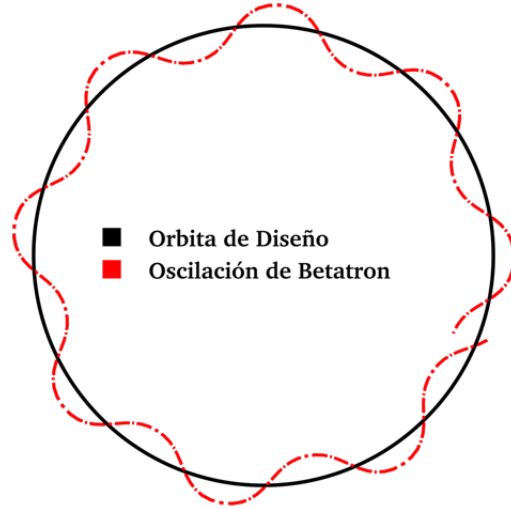


Figura 4.2: Oscilación de betatrón generada alrededor de la órbita de diseño por los elementos magnéticos cuadrupolares.

La dinámica de las partículas en el anillo de almacenamiento se ve influenciada por varios factores, como la fuerza magnética de los electroimanes y la energía de la partícula, entre otros. Además, el diseño y la disposición de los elementos magnéticos pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de la órbita de las partículas y en la eficiencia del anillo de almacenamiento, por lo que en esta sección se hablará más a detalle sobre esto.

4.3.1. Espacio libre

Los espacios libres son secciones dentro del anillo de almacenamiento que no tienen elementos magnéticos y permiten que las partículas se muevan en línea recta sin experimentar ninguna fuerza magnética. Estos espacios libres se caracterizan por su longitud, la cual se mide como la distancia entre dos elementos magnéticos consecutivos, y se denota como $l = s_1 - s_0$. Cabe mencionar que la longitud de los espacios libres puede variar en función del diseño del anillo de almacenamiento y de la aplicación específica del sincrotrón.

A partir de las soluciones de la Ec. (4.6), se puede hacer un arreglo matricial para un espacio libre como:

$$\begin{pmatrix} x(s_1) \\ x'(s_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

4.3.2. Cuadrupolo magnético

En el contexto del cuadrupolo de enfoque, la Ec. (4.6) se simplifica al considerar que la curvatura es $1/\rho = 0$, lo que implica que sólo se tiene en cuenta la función de enfoque 4.8. Si esta es constante, se define simplemente como K . Un cuadrupolo de enfoque se define como aquel en el que la intensidad K es positiva. Esto genera un enfoque en la componente horizontal hacia la órbita de referencia, mientras que en la componente vertical se produce un desenfoque en el desplazamiento.

Las soluciones de la Ec. (4.6) para el cuadrupolo forman las siguientes matrices:

$$\begin{pmatrix} x(s_1) \\ x'(s_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{K}l) & \frac{1}{\sqrt{K}} \sin(\sqrt{K}l) \\ -\sqrt{K} \sin(\sqrt{K}l) & \cos(\sqrt{K}l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} y(s_1) \\ y'(s_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\sqrt{|K|}l) & \frac{1}{\sqrt{|K|}} \sinh(\sqrt{|K|}l) \\ -\sqrt{|K|} \sinh(\sqrt{|K|}l) & \cosh(\sqrt{|K|}l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y(s_0) \\ y'(s_0) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Cuando la intensidad K es negativa, se denomina cuadrupolo de desenfoque, y provocará un desenfoque en la componente horizontal, mientras que se mantendrá el enfoque en el eje vertical.

4.3.3. Dipolo magnético

A partir de la Ec. (4.6), cuando existe un campo magnético constante B_y , se puede calcular el ángulo de desviación en la trayectoria de la partícula, el cual será congruente con la curvatura del anillo.

$$\theta = \frac{l}{\rho} \quad (4.12)$$

$$\begin{pmatrix} x(s_1) \\ x'(s_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta \\ -\frac{l}{\rho} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

4.3.4. Parámetros de Courant-Snyder

Para garantizar que las partículas sigan una trayectoria cerrada en el anillo de almacenamiento, se utiliza una ecuación de movimiento que toma la forma de una ecuación diferencial de Hill Ec. (4.14) para una dimensión, considerando $K_x = 1/\rho^2 + b_2(s)$

$$x'' + K_x(s)x = 0. \quad (4.14)$$

En general, los sincrotrones están compuestos por un conjunto de n celdas idénticas, por lo que la función gradiente K_x debe cumplir con una condición de periodicidad. Esto es fundamental porque nos permite tener teóricamente una estabilidad en el movimiento de las partículas. La solución para esta ecuación general se puede determinar en su forma matricial, utilizando los valores de x y x' ,

$$\begin{pmatrix} x(s) \\ x'(s) \end{pmatrix} = M(s_0 \rightarrow s) \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(s_0) \\ x'(s_0) \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Una reparametrización de los elementos de la matriz anterior se puede llevar a cabo como

$$a - d = 2\alpha \sin \mu \quad (4.16)$$

$$b = \beta \sin \mu \quad (4.17)$$

$$c = -\gamma \sin \mu \quad (4.18)$$

que da lugar a la matriz de un periodo (4.19), parametrizada en términos de los parámetros de Twiss.

$$M = \begin{pmatrix} \cos \mu + \alpha \sin \mu & \beta \sin \mu \\ -\gamma \sin \mu & \cos \mu - \alpha \sin \mu \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Las funciones α , β y γ en la Ec. (4.19) son conocidos en física de aceleradores como parámetros de Courant-Snyder [18] o de Twiss, y la μ es definido como el avance de fase. Para un elemento de la sección periódica, se construye una matriz de transporte de 3×3 que permite conocer los parámetros de Twiss en s_1 , si los conocemos en s_0 . La matriz de

3×3 se construye con los elementos de la matriz de transporte 2×2 , como se indica a continuación

$$\begin{pmatrix} \beta(s_1) \\ \alpha(s_1) \\ \gamma(s_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 & -2ac & b^2 \\ -ac & ad + bc & -cd \\ c^2 & -2cd & d^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta(s_0) \\ \alpha(s_0) \\ \gamma(s_0) \end{pmatrix}. \quad (4.20)$$

Esta matriz de transporte es fundamental para el estudio de la propagación de partículas a través de los componentes de la celda, permitiendo describir cómo se modifican los parámetros de Courant-Snyder en cada sección y, por tanto, cómo evoluciona la trayectoria de las partículas a lo largo del anillo de almacenamiento.

4.3.5. Aspectos de la dinámica de partículas en el espacio fase y emitancia.

Un parámetro importante en la física de aceleradores es la emitancia del haz, que se relaciona con el invariante de Courant-Snyder. La emitancia nos permite representar la distribución espacial y angular de las partículas a medida que viajan a través de la secuencia de elementos magnéticos y espacios libres en el sincrotrón. La emitancia es una medida fundamental de la calidad del haz de partículas, visto como una fuente de luz. Un valor bajo de emitancia indica un haz más enfocado y colimado, lo que es deseable para aplicaciones en la física de partículas y para las fuentes de luz.

Este invariante es análogo a la energía total de un oscilador armónico. Esto permite proponer una solución a la Ec. (4.14) de la forma

$$x_\beta(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\phi(s)). \quad (4.21)$$

Se puede mostrar que usando la Ec. (4.21) y su derivada x'_β en la siguiente ecuación (4.22), el resultado es el valor de la emitancia ϵ .

$$\beta x_\beta'^2(s) + 2\alpha x_\beta(s)x'_\beta(s) + \gamma x_\beta^2(s) = \epsilon \quad (4.22)$$

El invariante de Courant-Snyder nos proporciona información sobre el volumen que ocupa la distribución de las partículas en el espacio fase. La Ec. (4.22) describe una elipse en el espacio fase visualizada en un punto s de la circunferencia del acelerador. Cuanto menor sea el área de la elipse, más concentrada será la distribución de las partículas en el espacio fase, lo que indica un haz de partículas más coherente y de mayor calidad.

4.3.6. Función de dispersión

La partícula que viaja en la órbita cerrada ideal, tiene un momento de referencia p_0 . Sin embargo, el haz que se inyecta al anillo de almacenamiento tendrá una distribución de momentos. La desviación porcentual con respecto al momento de referencia p_0 se mide con el factor $\delta = (p - p_0)/p_0$. En la Ec. (4.23) se muestra la ecuación diferencial modificada que incorpora los términos de la desviación del momento. Cuando $\delta = 0$, se recupera el caso de ausencia de desviación en la Ec. (4.6). Esta modificación permite tener en cuenta la desviación del momento y su influencia en la trayectoria de la partícula en el anillo de almacenamiento. La siguiente ecuación contempla la desviación de momento δ .

$$x'' + \left(\frac{1 - \delta}{\rho^2(1 + \delta)} - \frac{b_2(s)}{(1 + \delta)} \right) x = \frac{\delta}{\rho(1 + \delta)} \quad (4.23)$$

La solución que satisface la Ec. (4.23) se expresa como una combinación lineal de una solución particular $D(s)\delta$ más la solución general x_β de la ecuación homogénea (4.21).

$$x = x_\beta(s) + D(s)\delta. \quad (4.24)$$

La función $D(s)$ es llamada *función de dispersión*. Para pequeños cambios en la desviación de δ , al sustituir la Ec. (4.24) en (4.23) se obtiene una ecuación diferencial para $D(s)$ en términos de las funciones gradiente y curvatura, $b_2(s)$ y $\rho(s)$.

$$D'' + b_2(s)D = \frac{1}{\rho} \quad (4.25)$$

La solución general será la suma de la solución general de la ecuación homogénea más una solución particular de (4.25). Si D' y d' son las derivadas de estas soluciones, se puede utilizar una matriz de transferencia para representar la evolución de la solución. Con esto

tenemos una matriz de transferencia para la función dispersión y nos permite calcularla en algún otro punto del anillo.

$$\begin{pmatrix} D(s) \\ D'(s) \end{pmatrix} = M(s_0 \rightarrow s) \begin{pmatrix} D(s_0) \\ D'(s_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d \\ d' \end{pmatrix}. \quad (4.26)$$

Por ejemplo, para un dipolo con campo magnético constante, el vector de dispersión \bar{d} toma la siguiente forma:

$$\bar{d} = \begin{pmatrix} d \\ d' \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho K} (1 - \cos \sqrt{K} s) \\ \frac{1}{\rho \sqrt{K}} \sin \sqrt{K} s \end{pmatrix}, & \text{si } K > 0 \\ \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho |K|} (-1 + \cosh \sqrt{|K|} s) \\ \frac{1}{\rho \sqrt{|K|}} \sinh \sqrt{|K|} s \end{pmatrix}, & \text{si } K < 0 \end{cases}.$$

4.3.7. Emitancia natural

La emitancia natural es una cantidad que se puede calcular de la radiación emitida por los electrones, de la siguiente manera:

$$\epsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{I_5}{I_2 - I_4}, \quad (4.27)$$

en donde C_q es una constante que dependerá de la estructura magnética del anillo, e I_5 , I_2 y I_4 son las integrales de radiación. Se busca una baja emitancia del haz de electrones para que un la radiación sincrotrón emitida en el anillo genere una alta brillantez.

$$I_2 = \int \frac{1}{\rho^2} ds \quad (4.28)$$

$$I_4 = \int \left(\frac{D}{\rho} \right) \left(\frac{1}{\rho^2} + 2K \right) ds \quad (4.29)$$

$$I_5 = \int \frac{\mathcal{H}}{|\rho|^3} ds \quad (4.30)$$

Las integrales de radiación en las Ecs. (4.28), (4.29) y (4.30), están en términos del radio de curvatura ρ , de la función de dispersión D , de la contribución cuadrupolar K y a la función \mathcal{H} en los dipolos [5], por lo que depende del diseño de la celda. \mathcal{H} se define en términos de la función dispersión y de la amplitud de la función betatrón horizontal β_x , en forma similar al invariante del Courant-Snyder.

$$\mathcal{H} = \frac{1}{\beta_x} \left[D^2 + (\beta_x D' - \frac{1}{2} \beta_x' D)^2 \right]. \quad (4.31)$$

4.3.8. Cromaticidad natural

Además de la dispersión, existe otro fenómeno relacionado con el cambio de momento de las partículas cuando son enfocadas por los cuadrupolos. Las partículas a diferentes momentos **experimentan** fuerzas de enfoque distintas, lo que da lugar a que se generen diversas funciones de betatrón.

La cromaticidad, en física de aceleradores, se genera por la fuerza de enfoque de los cuadrupolos. Este fenómeno es conocido como *cromaticidad natural* ξ [19] y su magnitud depende del diseño del arreglo de imanes. Recordando la definición del gradiente de campo para los cuadrupolos $K(s)$ Ec. (4.8), se define la integral que calcula la cromaticidad como:

$$\xi_{x,y} = \mp \frac{1}{4\pi} \oint_C \beta_{x,y}(s) b_2(s) ds. \quad (4.32)$$

La cromaticidad es un término que debe corregirse al agregar sextupolos al diseño porque si el haz tiene una amplia distribución de momentos, parte de las partículas pueden estar sobre resonancias.

4.3.9. Tonos de betatrón

Los tonos de betatrón horizontal y vertical se definen como el número de oscilaciones de betatrón $\nu_{x,y}$ por revolución [5], estas oscilaciones se ejemplifican en la Fig. 4.2. El cálculo de estos parámetros se hace mediante la siguiente expresión:

$$\nu_{x,y} = \frac{1}{2\pi} \int_s^{s+C} \frac{ds}{\beta_{x,y}(s)} \quad (4.33)$$

En general, las líneas de resonancia se encuentran cuando $n\nu_x + m\nu_y = p$, donde n, m y p son números enteros. Sumando $|n| + |m|$ podemos calcular el orden de la resonancia y el diseño debe considerar que el punto de operación no esté cerca de una resonancia menor a grado 6.

Estas resonancias pueden generar problemas de inestabilidad en el haz. Las partículas a cero momento de desviación tendrán un punto de operación distinto a las que se encuentren entre $\pm 3\%$, esto provoca que al cruzar órdenes de resonancia menor es probable que se generen inestabilidades en el movimiento de los electrones.

4.3.10. Corrección cromática

Existen dos principales razones por las que se debe realizar una corrección cromática:

1. Los tonos pueden cruzar resonancias y hacer que las partículas se pierdan del paquete al dar vueltas al anillo.
2. Se pueden generar inestabilidades colectivas, a consecuencia de la cromaticidad negativa. Por ejemplo, el efecto cabeza-cola [20].

Al agregar los sextupolos a la celda magnética se consigue la corrección cromática [19], las partículas que se encuentran fuera del centro de la órbita reciben una fuerza de enfoque proporcional al cuadrado de su desplazamiento. Esta es la contribución de campo sextupolar $b_3(s) = \frac{1}{2} \frac{1}{(B\rho)} \frac{d^2 B_y}{dx^2}$, que se agrega a la integral, que calcula la cromaticidad natural para calcular la contribución de los cuadrupolos, y que el valor de la integral sea lo más cercano a cero [21]. Esto se consigue con más de una familia de sextupolos en el diseño.

$$\xi_{x,y} = \mp \frac{1}{4\pi} \oint_C [2b_3(s)D(s) - b_2(s)] \beta_{x,y}(s) ds \approx 0 \quad (4.34)$$

Capítulo 5

Herramientas de cómputo y métodos de optimización que se usan en esta tesis

5.1. OPA

El diseño de un sincrotrón es un proceso complejo que puede requerir de un alto poder de procesamiento, que no siempre es **de fácil** acceso. Sin embargo, en una primera aproximación se necesita hacer la dinámica lineal del diseño que proporcionará una idea de los parámetros y restricciones que se obtendrán de la celda magnética, esto se puede realizar en un equipo convencional de cómputo. La herramienta que facilitó este trabajo fue el software desarrollado por A. Streun, OPA [22] en su versión 4.047 y se puede encontrar en su página web con su última actualización.

La interfaz gráfica de OPA facilita la visualización de las funciones lineales y permite la modificación instantánea de los elementos en la estructura. Contiene también una sección de optimización de sextupolos para tener una idea general de la dinámica no lineal y un *tracking* de partículas que muestra el espacio fase.

5.1.1. Construcción del archivo de entrada en OPA

Para escribir un archivo de entrada para el programa, se crea un documento de texto con la terminación *.opa*. En este archivo se puede definir los elementos magnéticos que conformarán una celda.

Al principio del documento se definen los parámetros globales del diseño como la energía y los valores iniciales de las funciones β y dispersión. Los elementos son etiquetados con un nombre corto correspondiente a su definición, por ejemplo, el primer espacio libre que aparece en la celda será **D1**. Después se define el carácter del elemento, será **Drift** para los espacios libres, **Quadrupole** para los cuadrupolos, etc.

La longitud de cada elemento siempre se definirá con **L**, en el caso de los cuadrupolos se requiere de su intensidad definida como **K** y para los dipolos se define el ángulo de desviación en **T**, en grados. El programa está equipado para agregar **Kicker**, y correctores, elementos que refinan el diseño, pero que en esta etapa se considera que con pocas variables se puede encontrar una solución que nos da idea del diseño general.

Definición de elementos extra que hacen más robusta la solución encontrada.

- I) **D1** : **Drift**, $l = 2.55$, $ax = 5.00$, $ay = 5.00$;
- II) **QF1** : **Quadrupole**, $l = 0.295$, $k = 2.89400e+00$, $ax = 5.00$, $ay = 5.00$;
- III) **DQ1** : **Bending**, $l = 1.078$, $T = 1.6460e+00$, $k = -1.6451e+00$,
 $T1 = 0.823$, $T2 = 0.823$;
- IV) **SD1** : **Sextupole**, $L = 0.2$, $K = -58.627522$, $N = 4$;
- V) **O1** : **Octupole**, $L = 0$, $K = -98.654$, $N = 4$;

Una vez que se tienen definidos todos los elementos que se utilizan, se procede a construir la red magnética o celda, que es la estructura que se repite n -veces hasta conformar el anillo. En el caso de la celda del modelo 6.1.1 se tiene una estructura conformada por un **TBA**, **MLD**, **DQ2**, **-MLD1**, **-TBA1**. El **TBA** es una subcelda conformada por tres dipolos y **MLD** es un arreglo de cuadrupolos y espacios libres. En OPA, para invertir la secuencia de

elementos se coloca un signo menos enfrente de un arreglo previo, como se puede ver en la sección de la celda definida como CELL a continuación:

A : A1, A2, A3, A4, A5;

DB : B1, B2, B3, B4, B5;

TBA : D1, S7a, D3, QF1, D2, QD2, D3, -A, D4, QD3, D4, SD1, D5D6, O1, QF4, D7D8, SF1, SF1, D7D8, QF4, O1, D9D10, SD1, D3, QD5, D11, DB, D12, S8a, D12;

MLD : QF6, D13, DQ1, D14, QF8, D15, S3a, D15;

CELL : TBA, MLD, DQ2, -MLD, -TBA;

RING : 32*CELL;

El anillo o RING se define multiplicando por el número de celdas que lo conforman, en este caso 32 celdas. En el Apéndice A se muestra el código de entrada completo del diseño de la secc. 6.1.1 para ejemplificar la construcción del archivo de entrada.

5.1.2. Características generales del programa OPA

Una vez cargado el archivo en el programa, podemos acceder a una visualización de la óptica lineal de la celda. En esta sección del programa se puede elegir el cálculo de una solución periódica o su evolución a partir de valores iniciales de las funciones β . Todas las figuras que se muestran en el capítulo 6 son generadas en OPA porque se consideró que es una manera fidedigna de corroborar los diseños desarrollados en el código de MATLAB. En la Fig. 5.1 se muestran los controladores deslizantes usados para variar manualmente las intensidades o longitudes de los elementos magnéticos. Con esto se tuvo una intuición del comportamiento de las funciones, al realizar cambios en los elementos.

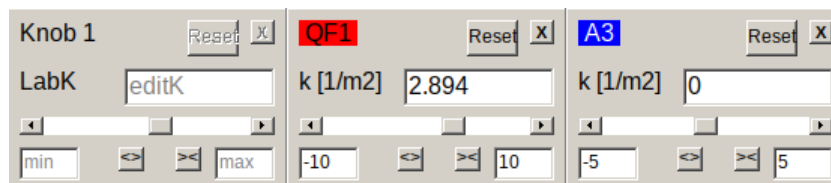


Figura 5.1: En la imagen se muestran los controladores que están en el módulo de óptica lineal en OPA.

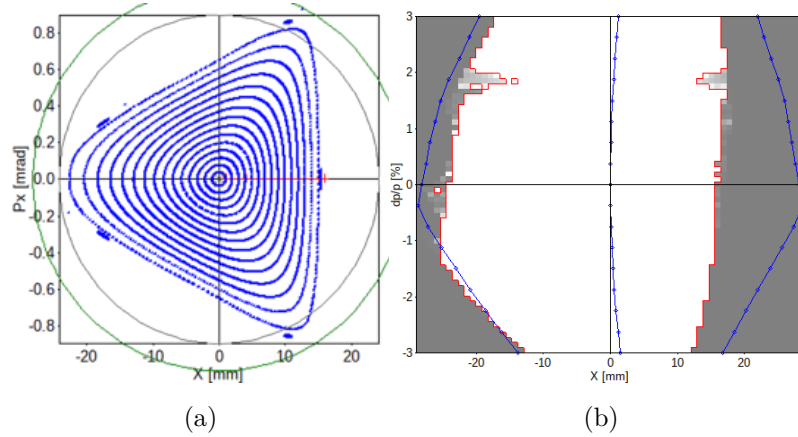


Figura 5.2: En la figura (a) se muestra el espacio fase del modelo DBA del ESRF a desviación de momento cero, generada en una simulación de partículas de 1024 vueltas al anillo. En la figura (b) se muestra la zona de estabilidad para partículas con diferente desviación de momento.

5.2. Programa de optimización de la celda en MATLAB.

El código del programa escrito en Matlab es el resultado de la tesis de maestría en Ciencias de Domínguez [4]. La Fig. 5.3 muestra el diagrama de flujo del algoritmo que usa el programa. Para los modelos que se estudian en el capítulo 6 es necesario modificar la definición de la celda a optimizar. El programa optimiza un vector que contiene los elementos de la celda que se optimizan, considerando la emitancia y periodicidad de las funciones lineales. En general, los elementos que se eligieron variar para conseguir reproducir la celda fueron longitudes de espacios libres, intensidades de cuadrupolo y ángulos de desviación de los dipolos.

Cuando se inicia el proceso de variación, se puede visualizar cómo evolucionan las funciones β y si se cumplen las restricciones impuestas para reproducir el diseño original, por ejemplo, que la función β_x no rebase los 10 m en el eje y , como se muestra en la Fig. 5.4.

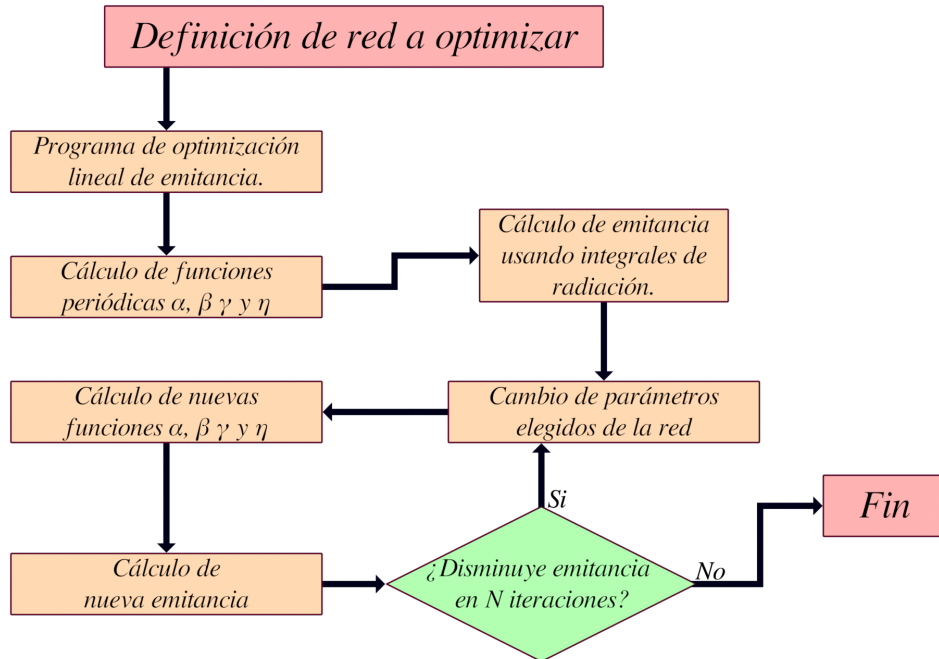


Figura 5.3: Diagrama de flujo del programa usado en Matlab para la optimización lineal tomado de la Ref. [4].

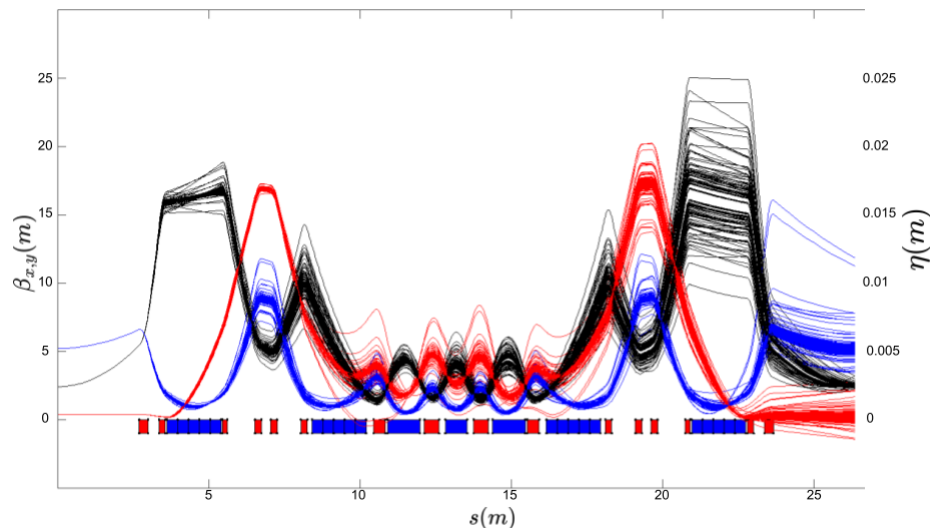


Figura 5.4: En la figura se muestra la evolución temporal de las soluciones de las funciones β y de la dispersión en la optimización para la reproducción del modelo ESRF-EBS. Las soluciones están ligadas a condiciones iniciales en los valores de las funciones beta y mediante el algoritmo se pretende conseguir simetría al lograr el mismo valor al final de la celda.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se reportan resultados obtenidos de los diversos modelos considerados bajo el formato ESRF-EBS. Se introduce el esquema de la Fig. 6.1, para indicar el orden en que se realizó el estudio de los diferentes modelos y sus principales características. En la primera columna de rectángulos verdes se muestra el esfuerzo en lograr una emulación de la celda del ESRF-EBS y su variante. Se consideró que este primer paso debería ser el punto de partida adecuado para desarrollar modelos que estén dentro del marco de la celda europea.

Las modificaciones que se hicieron en los modelos de la rama con rectángulos azules se han realizado con el propósito de conseguir una circunferencia menor. Adicionalmente, en la sección 6.2 se explora la idea de agregar dipolos RB (reverse bend) en un modelo 7BA. Partiendo de los modelos con circunferencia de 400 m, en la sección 6.3 (naranja) se propone modificar el número de dipolos por celda. Se considera que un esquema 9BA podría tener cambios deseables en comparación al esquema 7BA, en términos de emitancia. También se consideró el uso de súper-imanes (morado), en el centro de una celda tipo ESRF-EBS. En la sección 6.4 se muestran modelos 7BA que exploran esta opción. Características relevantes de cada modelo se muestran en la Fig. 6.1 y se desarrollarán en las siguientes secciones. ✓

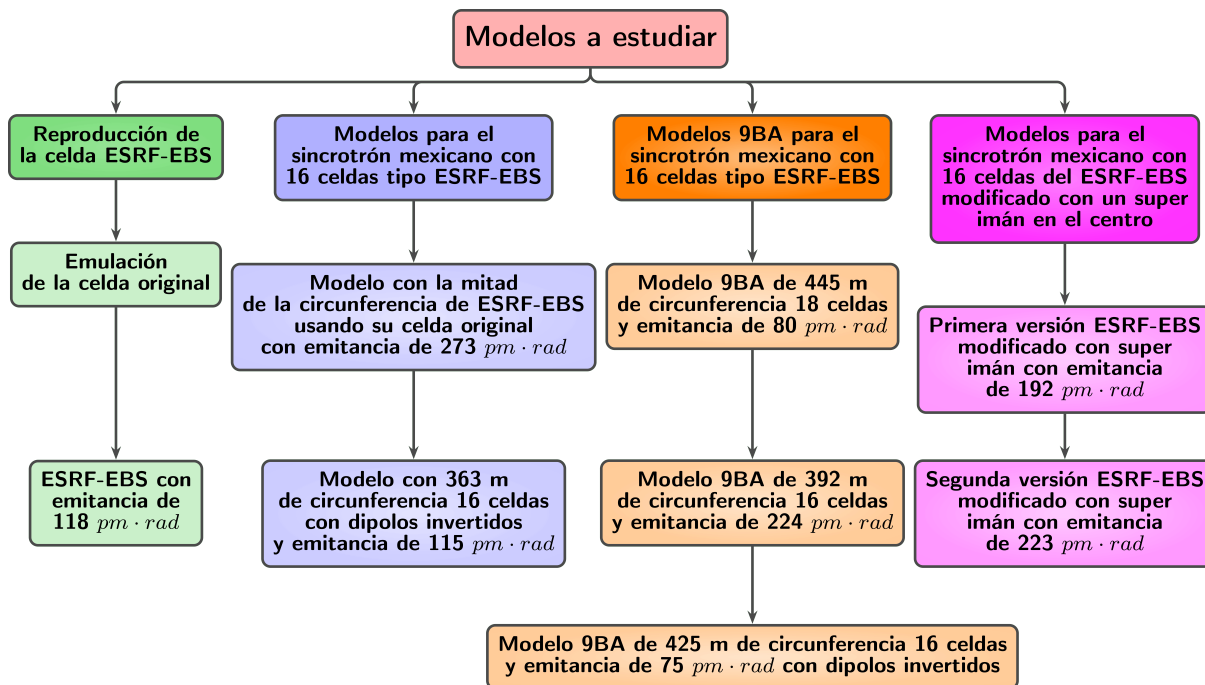


Figura 6.1: Esquema del desarrollo de los modelos que se estudian en este capítulo. Los modelos de los cuadros verdes se desarrollan en las secciones 6.1, los de cuadros azules en las secciones 6.2, los modelos de los cuadros naranjas se encuentran en las secciones 6.3, y los de cuadros rosas están los modelos que se desarrollan en las secciones 6.4.

6.1. Reproducción de la celda ESRF-EBS

La buena reproducción de la celda ESRF-EBS proporciona un punto de referencia para evaluar la flexibilidad del diseño, y con ello se pretende modificar la celda sin alterar significativamente sus elementos magnéticos. Con este objetivo, en esta sección se presenta un modelo donde la emitancia ha sido minimizada usando el código de minimización aplicado a la reproducción de la celda original de la actualización de ESRF.

6.1.1. Emulación de la celda original

En la búsqueda bibliográfica realizada se encontró poca información que permitiera estructurar la celda de ESRF-EBS. Por ello fue necesario conseguir datos aproximados de longitudes de los elementos magnéticos utilizando las imágenes proporcionadas en el *ESRF Orange Book* [12]. Digitalmente, se determinaron en primera aproximación longitudes de espacios libres y elementos magnéticos. Se compararon las mediciones realizadas con la de los imanes en el apartado *Manget Specification list for S28A lattice* del diseño conceptual. Con estos datos se creó un diseño base, variando manualmente en OPA las intensidades de los cuadrupolos hasta conseguir una celda con funciones β parecidas a las del ESRF-EBS. En este modelo se obtuvo una emitancia de 1.4 nm, un valor mayor al objetivo de 137 $pm \cdot rad$. Este ejercicio se hizo con la finalidad de entender y cimentar la estructura de los elementos magnéticos.

El siguiente paso consistió en introducir esta celda en el programa escrito en MATLAB para optimizar la celda. En la optimización, se variaron los parámetros de espacios libres, ángulos de desviación de los dipolos e intensidades de cuadrupolos para conseguir una emitancia del orden de la original. El resultado de este proceso se muestra en la Fig. 6.2, generada con el programa OPA para corroborar una optimización apropiada.

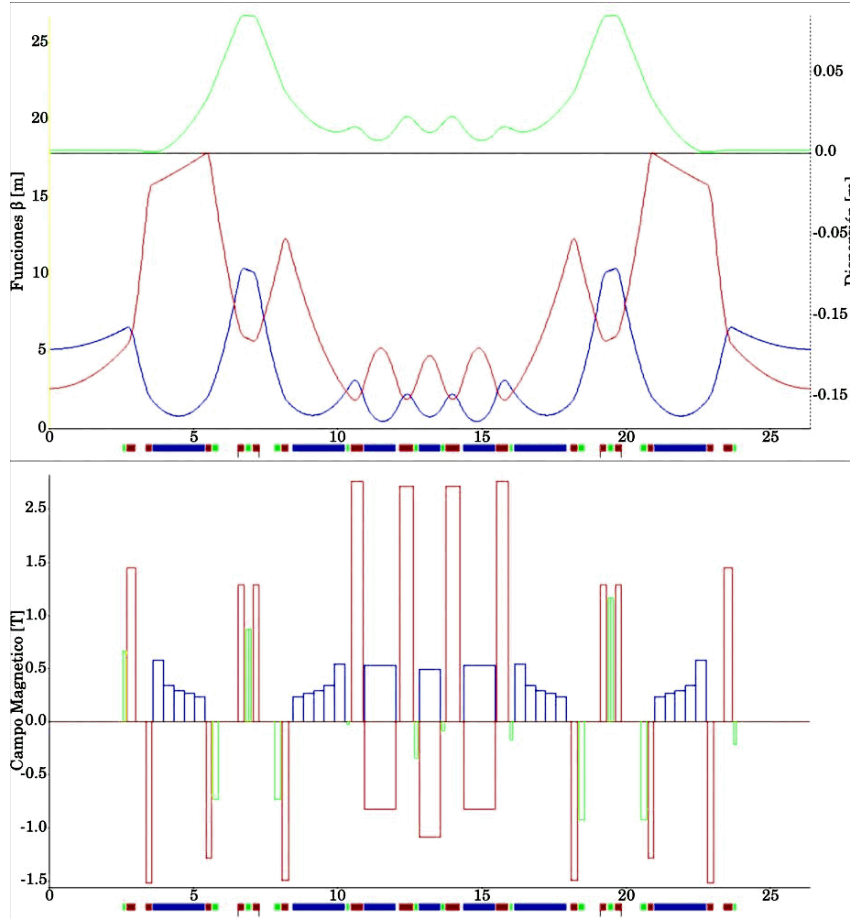


Figura 6.2: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo replicado del ESRF-EBS de una emitancia de $137 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verde respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 25 mm del núcleo de hierro.

El programa OPA contiene un módulo que permite optimizar la dinámica no lineal de la celda que se trabaja. El programa tiene un módulo para calcular la apertura dinámica y con esto se puede determinar si la solución encontrada con el módulo no lineal es adecuada. En la Fig. 6.3b se muestra una apertura en el eje x de aproximadamente 6 mm, pero a desviaciones de momento diferente de cero no se tiene un resultado equivalente, lo que significa que debe usarse o implementarse un esquema de optimización mejor.

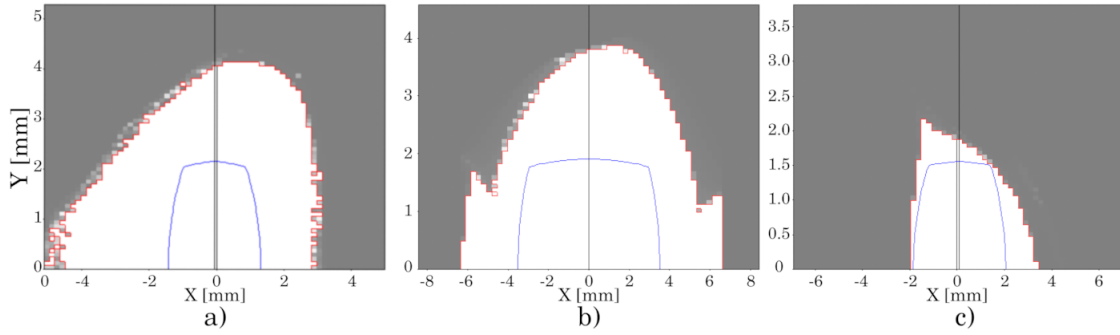


Figura 6.3: Comparación de la apertura dinámica del modelo de la emulación de la celda original del ESRF-EBS cuyas funciones están en la Fig. 6.2. En (a) se representa la apertura dinámica para desviación de momento $\delta p/p = -3\%$, en (b) la apertura dinámica para $\delta p/p = 0\%$ y en (c) la apertura dinámica para $\delta p/p = 3\%$.

6.1.2. ESRF-EBS con emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$

Usualmente las actualizaciones en los sincrotrones están sujetas a constricciones propias del sincrotrón anterior debido a que parte de la estructura del túnel que aloja al sincrotrón no puede modificarse, un ejemplo son las líneas de experimentación que están fijas.

Utilizando el código en Matlab se buscó minimizar la emitancia definida como función objetivo de optimización del modelo comparativo del ESRF-EBS de la sección 6.1.1. Se variaron los parámetros ampliando el intervalo de valores que podían tomar, con el propósito de buscar una solución de menor emitancia. La longitud de la celda se mantuvo fija para mantener la circunferencia del anillo del ESRF-EBS en 844 m aproximadamente. Se logró obtener una emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ y las funciones lineales no cambiaron en su forma como se muestra en la Fig. 6.4.

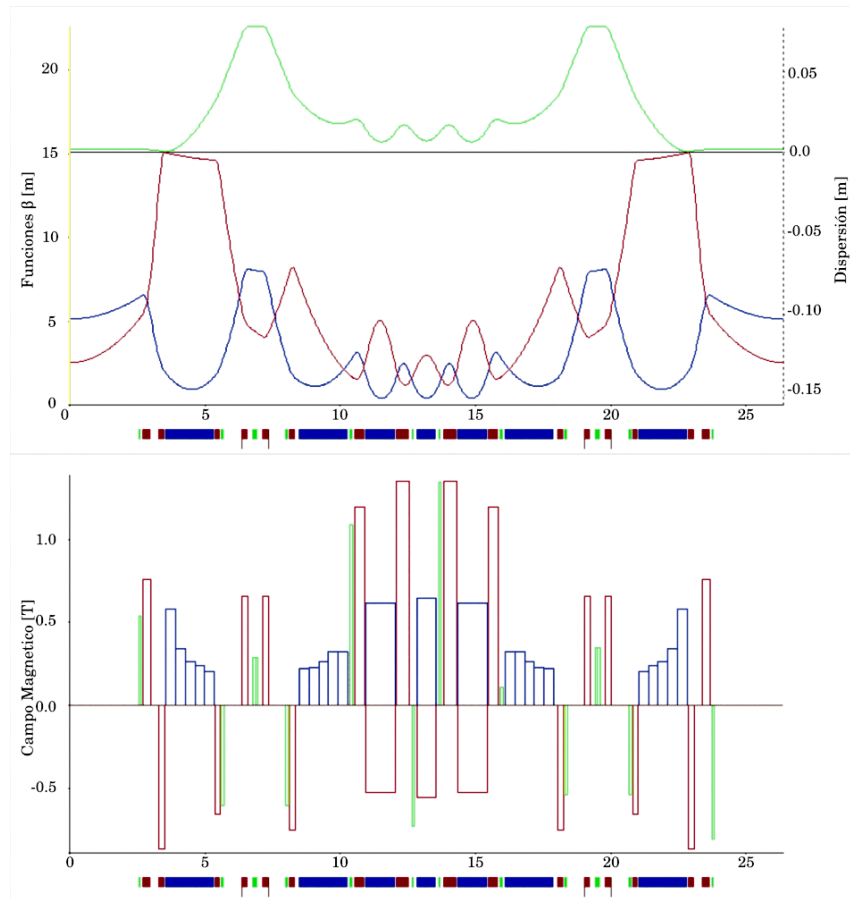


Figura 6.4: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda con emitancia mínima de la emulación del ESRF-EBS, obtenida de OPA y una emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm del núcleo de hierro.

La Fig. 6.5 es una gráfica del espacio x vs dp/p , que muestra las amplitudes de estabilidad horizontal en función de la desviación de momento de las partículas. Se observa que la apertura disminuyó en el eje x de 6 mm a 1.5 mm aproximadamente a cero momento dp/p , se espera tener este tipo de comportamiento al disminuir la emitancia.

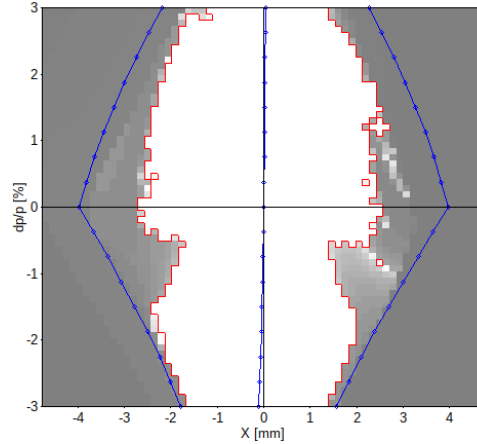


Figura 6.5: Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , para el modelo ESRF-EBS con emitancia de $118 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.2. Modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS.

Para obtener un modelo con circunferencia aproximada a 400 metros partiendo del ESRF-EBS se decidió disminuir el número de celdas a la mitad. Para 16 celdas, se modificaron los ángulos de desviación de los dipolos para lograr que la órbita cierre. Además, se explora la posibilidad de un modelo 7BA con dipolos RB. Este es un concepto utilizado en diversos laboratorios como el sincrotrón suizo SLS y en el sincrotrón francés SOLEIL.

6.2.1. Modelo con la mitad de la circunferencia de ESRF-EBS, usando su celda original con emitancia de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$

Para lograr una circunferencia de la mitad del anillo original, se multiplicó por dos cada ángulo de desviación de los dipolos. La emitancia resultante fue de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ a una energía de 3 GeV, que es la mitad de la energía del diseño original del ESRF-EBS. Este resultado es compatible con Ec. (6.2).

Se considera que el avance de fase entre los picos de alta dispersión para el modelo del ESRF-EBS, es un factor que se debe tener en cuenta para que se logre una dinámica no lineal adecuada. El estudio está fundamentado en la incorporación de sextupolos en estas

regiones para la eliminación de las aberraciones geométricas [23], en donde la diferencia de la fase debe cumplir la Ec. (6.1). Esto es conocido como el *principio no intercalado* [24].

$$(\Delta\phi_x, \Delta\phi_y) = ((2p + 1)\pi, q\pi) \quad (6.1)$$

con $p, q \in \mathbb{N}$.

Este principio es consistente con la transformación $-I$ [25], usada para la corrección cromática en el ESRF-EBS.

Para poder usar la transformación $-I$ se ha modificado el programa en Matlab, que optimiza las funciones lineales de una celda para calcular el avance de fase en la celda. Con esto se pudo hacer una optimización del diseño con la restricción de obtener una diferencia en avance de fase cercana a $\Delta\phi_x = 3\pi$ y $\Delta\phi_y = \pi$.

La optimización resultante de Matlab se comparó en el programa OPA y su celda resultante se muestra en la Fig. 6.6.

Como primer acercamiento a la dinámica no lineal se agregaron sextupolos a la celda, y se optimizaron con el programa OPA. Este el programa calcula, mediante una simulación de seguimiento de partículas, la gráfica de x contra el cambio de momento dp/p de las partículas que sobreviven 100 vueltas. En la Fig. 6.7 se muestra que la estabilidad horizontal a cero desviación de momento alcanza al menos 6 mm, y a desviación de momentos diferentes de cero, un mínimo de 3 mm.

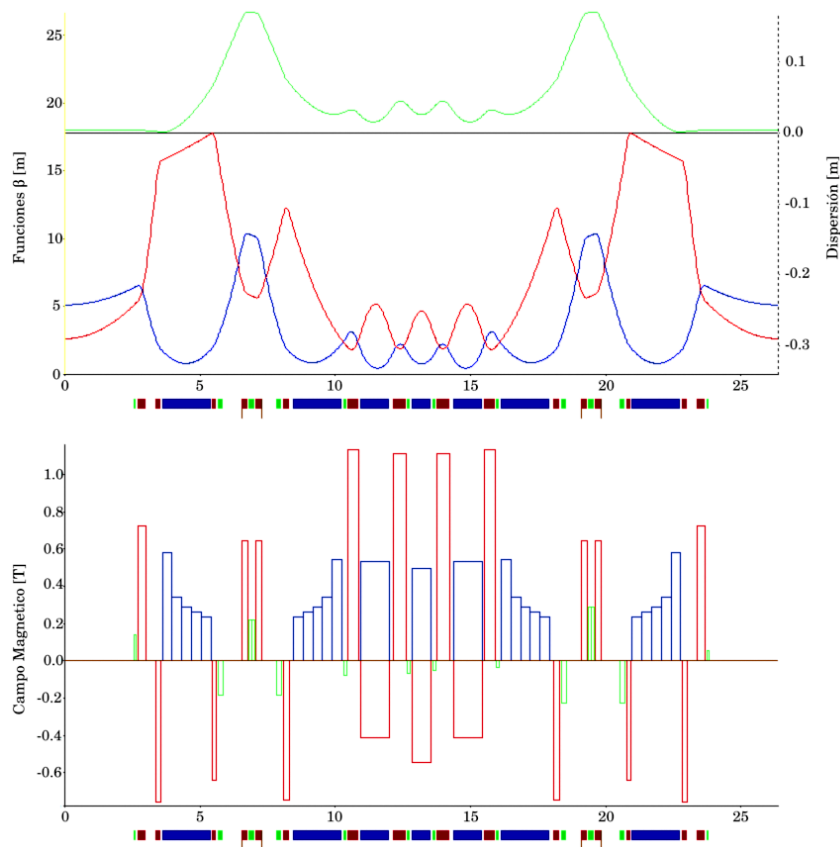


Figura 6.6: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para la celda original con mitad de circunferencia de la emulación del ESRF-EBS, obtenida con OPA y con emitancia de $273 \text{ pm}\cdot\text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 25 mm del núcleo de hierro.

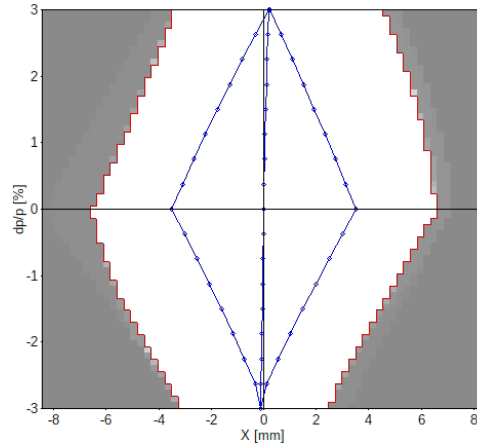


Figura 6.7: Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , para el modelo con la mitad de la circunferencia de ESRF-EBS, usando su celda original con emitancia de $273 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.2.2. Modelo con 363 m de circunferencia, 16 celdas con dipolos invertidos y emitancia de $115 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

En la cuarta generación de fuentes de luz, el uso de los dipolo-cuadrupolos tipo RB también llamados dipolos invertidos, han ganado interés debido a su potencial para reducir la emitancia. Los dipolos RB se caracterizan por tener su ángulo de desviación negativo, lo que invierte la curvatura de la trayectoria.

La introducción de los dipolos RB al modelo del ESRF-EBS con mitad de circunferencia se hizo con el fin de reducir la emitancia. Los dipolos LGB se redujeron en longitud para compensar el espacio añadido con los RB.

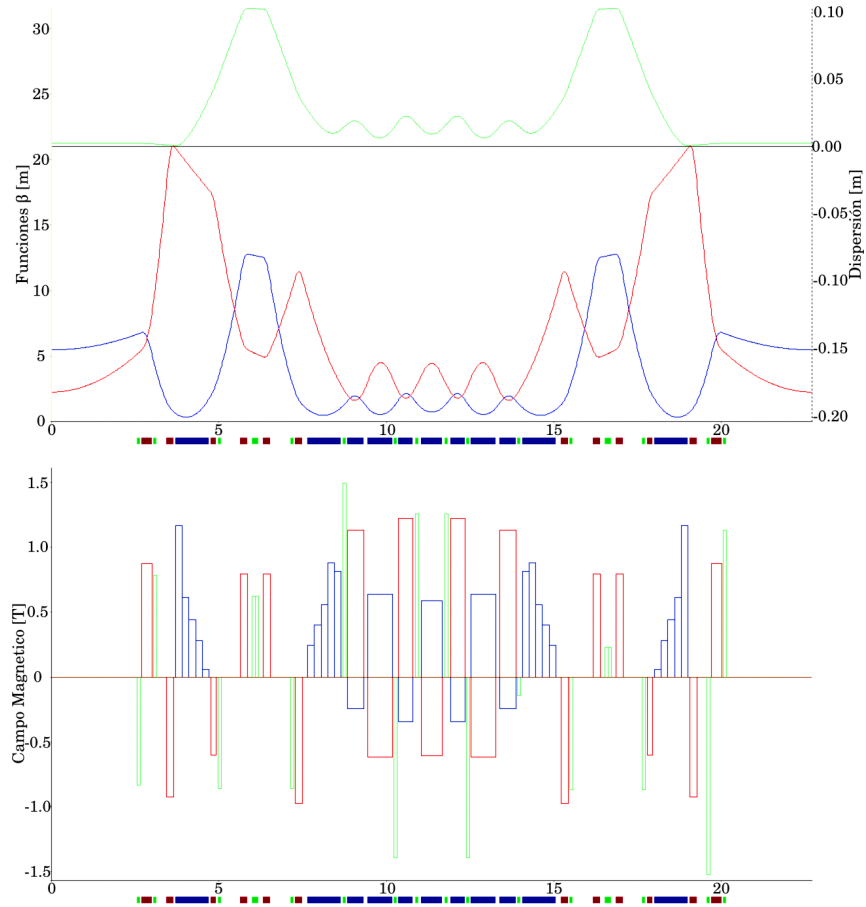


Figura 6.8: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) del modelo con 363 m de circunferencia, 16 celdas con dipolos invertidos y emitancia de $115 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los cuadrupolos, dipolos y sextupolos son representados en rectángulos de colores rojo, azul y verdes respectivamente. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia 25 mm.

De manera similar a otros modelos propuestos en la literatura [26] los cuadrupolos en el centro se modificaron para agregar los dipolos RB, agregando los ángulos de desviación con signo negativo en los programas de diseño. La longitud de la celda se redujo disminuyendo la longitud de los dipolos cuadrupolos y de los dipolos con gradiente longitudinal, consiguiendo una longitud de la celda de 22.70 m. Con 16 celdas se consigue un anillo de circunferencia de 363.24 m. Se obtuvo una emitancia de $115 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ y cromaticidades x y y de -65.82 y -51.31, respectivamente. Las intensidades los elementos magnéticos se incrementaron al aplicarse las modificaciones. Las intensidades de los campos magnéticos

se muestran en la Fig. 6.8.

Se realizó una optimización a las intensidades de los sextupolos con el programa OPA, encontrándose las aperturas dinámicas a distintos momentos, en la Fig. 6.9 se muestra que en promedio que la optimización fue benevolente con la apertura dinámica.

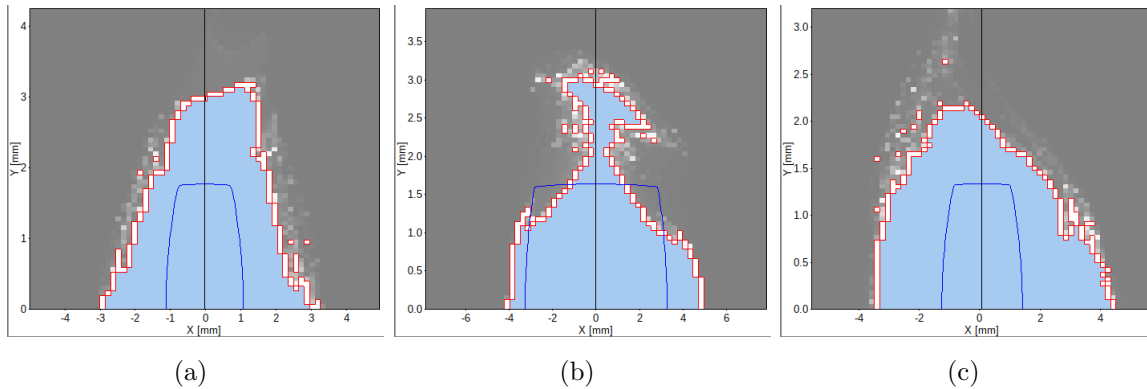


Figura 6.9: Apertura dinámica para una celda ESRF-EBS 7BA con antibends y longitud menor. La figura en (a) representa la apertura dinámica para desviación de momento $\delta p/p = -3\%$, en (b) la apertura dinámica para $\delta p/p = 0\%$ y (c) la apertura dinámica para $\delta p/p = 3\%$.

6.3. Modelos 9BA para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS

Con el fin de obtener un diseño de menor emitancia, se incrementa el número de dipolos por celda de siete a nueve, logrando una celda del tipo 9BA. Un ejemplo de este tipo de estructura está en la actualización del sincrotrón de Berkeley, el ALS-U, donde se consigue reducir la emitancia de $2000 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ a $108 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ incrementando el número de dipolos de tres a nueve, de acuerdo a la expresión para la emitancia [27]

$$\varepsilon = C_L \frac{E^2}{N_D^3} \quad (6.2)$$

Si bien, la emitancia ε en la ecuación está relacionada con constante C_L , con la energía de diseño E , y con el número de los dipolos N_D , se puede reducir la emitancia incrementando el número de dipolos, sin alterar los otros dos factores, para llevar a cabo una actualización del anillo.

6.3.1. Modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$

Para agregar dos dipolos a la celda y mantener los 26 metros por celda, se propuso reducir los dipolos LGB de 1.8 m a 1 metro de longitud. De esta manera se mantuvo el balance en las longitudes de los elementos en la celda. El modelo se optimizó con 18 celdas y se planteó seguir aumentando el número de manera gradual. Los dipolos-cuadrupolos de la celda 9BA tienen una longitud de 0.75 m.

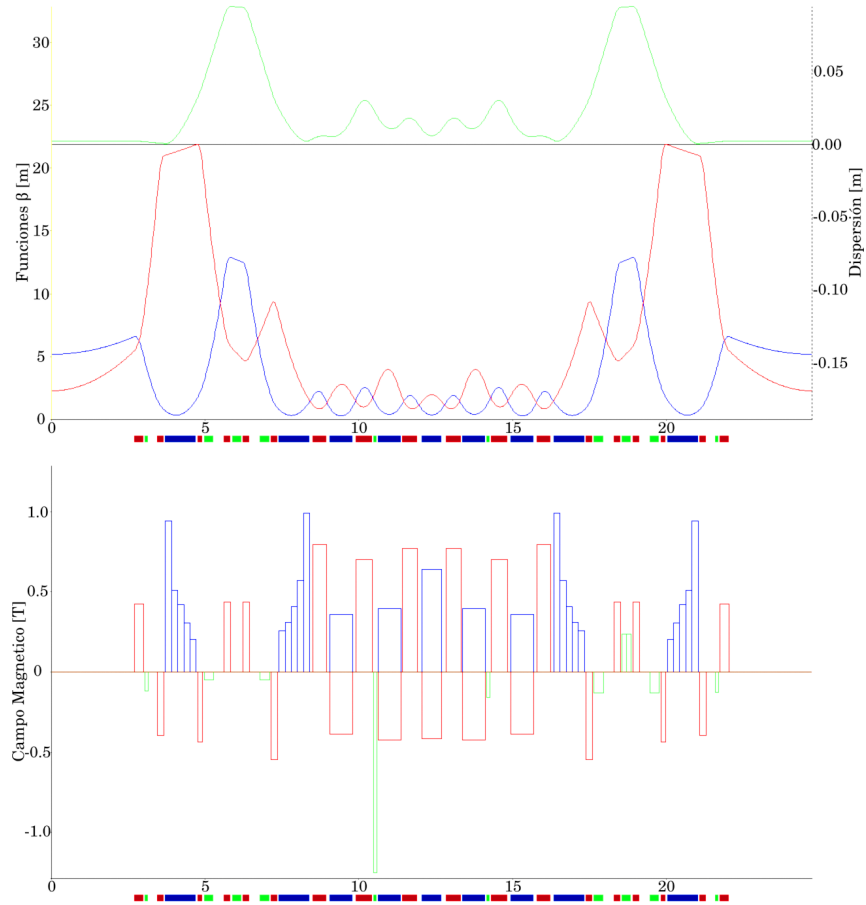


Figura 6.10: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm.

Las modificaciones y optimización en Matlab dan como resultado una celda de 24.74 m de longitud y una emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la Fig. 6.10 se muestran las funciones lineales que resultan de la optimización, usando OPA.

Para efectos comparativos se optimizaron las intensidades de los sextupolos con el programa OPA, pero no se logró una apertura dinámica adecuada, como se puede ver en la Fig. 6.11 Este modelo no parece lograr la reducción deseada de emitancia y apertura dinámica.

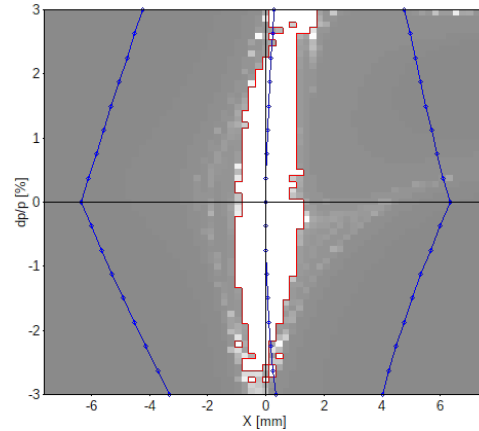


Figura 6.11: Se muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , en el modelo 9BA de 445 m de circunferencia, 18 celdas y emitancia de $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.3.2. Modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$

Con la finalidad de corroborar que la dinámica no lineal se corrige mejor al tener intensidades de cuadrupolo menores, se parte del modelo 6.3.1 ajustando el programa escrito en Matlab para conseguir cromaticidades naturales de -50 aproximadamente. Además, se redujo el número de celdas a 16 en el anillo modificando los ángulos de desviación de los dipolos.

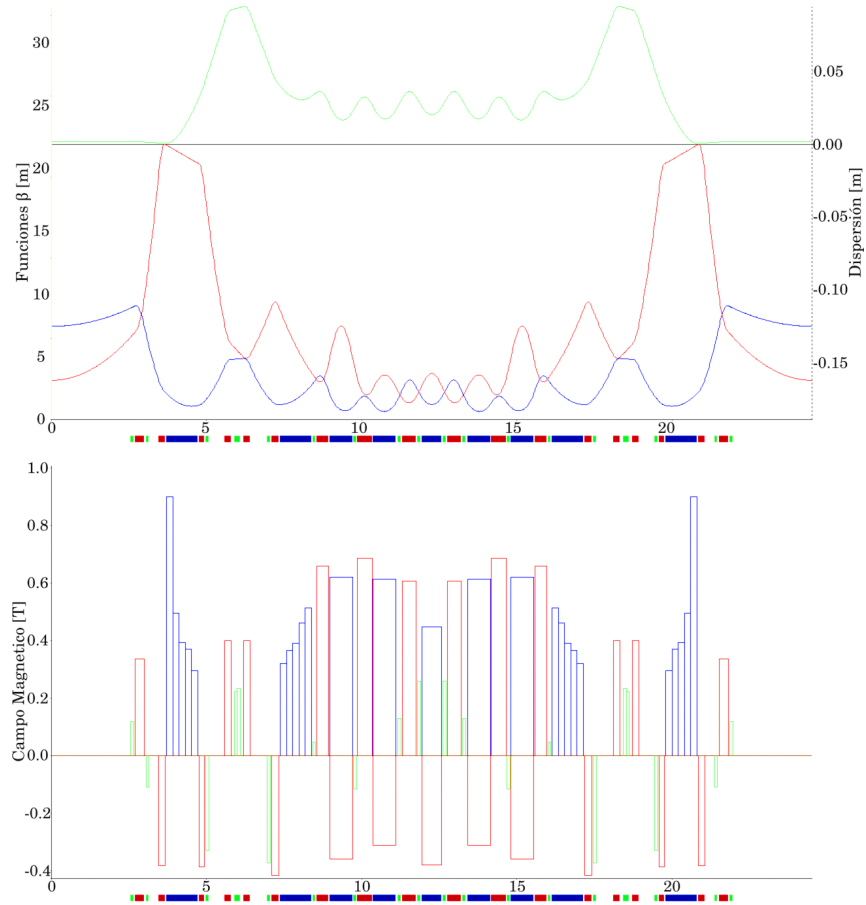


Figura 6.12: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm.

Estos cambios incrementan la emitancia a $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, pero la estabilidad horizontal del haz tiene una mejorara considerable como se muestra en la Fig. 6.13 cuando OPA realiza una breve optimización de sextupolos. Las funciones β se muestran en la Fig. 6.12.

Queda pendiente hacer un ajuste en el avance de fase en la celda cercano a $(3\pi, \pi)$ para ver si hay reducción en la emitancia y si se conserva la actual apertura dinámica.

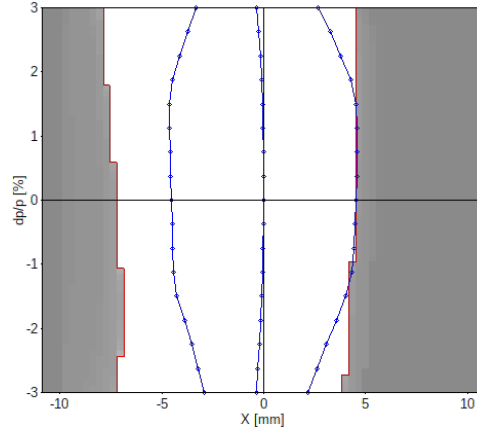


Figura 6.13: La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , para el modelo 9BA de 392 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $224 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.3.3. Modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ con dipolos invertidos

Al modelo 9BA anterior se le realizaron modificaciones en los cuadrupolos ubicados en el centro de la celda, agregándoles un ángulo de desviación negativo, lo que los convierte en cuadrupolos-dipolos invertidos. Esto se ilustra en el centro de la Fig. 6.14, donde los elementos modificados se representan como rectángulos con borde azul orientados hacia abajo.

Se observó que la optimización de la dinámica lineal fue más flexible después de agregar los ángulos de desviación adicionales, en comparación a los modelos mostrados en las secciones anteriores. Esto permitió reducir la emitancia sin perder la simetría del esquema ESRF-EBS.

El modelo tiene 16 celdas que conforman una circunferencia de 426 m, y cuenta con una emitancia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ y cromaticidades de -93.35 y -64.97.

Al igual que en otros diseños de baja emitancia, el modelo presenta una región de estabilidad limitada (Fig. 6.15) a una región menor al -2% . La optimización de la dinámica no lineal se realizó en OPA, y esta primera aproximación sugiere que podría incrementarse la apertura dinámica con una metodología más robusta.

El modelo presentado en esta sección se considera muy atractivo debido a su baja emitan-
cia. Por esta razón este modelo ha sido estudiado con métodos desarrollados por el grupo
de estudio, con el objetivo de mejorar la dinámica no lineal. Los resultados preliminares
son alentadores, por lo que se continuará explorando este enfoque.

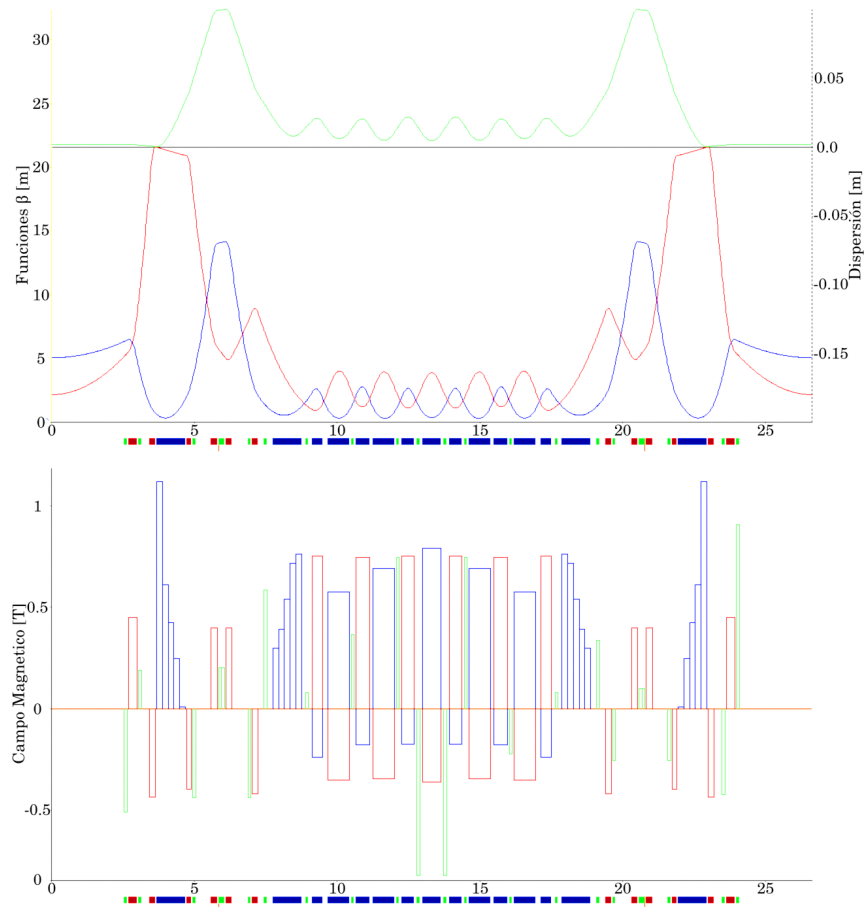


Figura 6.14: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) para una celda del modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitan-
cia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ con dipolos invertidos. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio
de referencia de 12.5 mm.

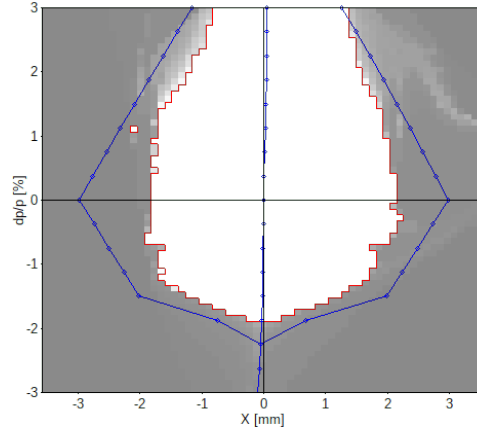


Figura 6.15: La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , del modelo 9BA de 425 m de circunferencia, 16 celdas y emitancia de $75 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ con dipolos invertidos.

6.4. Modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas del ESRF-EBS con un súper imán en el centro.

El SLS [28], al ser una fuente de luz de tercera generación, desarrolló métodos para conseguir una celda compacta de baja emitancia. En su actualización, debido a su circunferencia de aproximadamente 300 metros, no se consideró viable una celda MBA tipo MAX IV, ni una celda HMBA como la que ya se ha explorado. En su diseño se agregaron dipolos invertidos y dipolos LGB, con el propósito de tener una emitancia mínima. En el centro de la celda se coloca un super imán, caracterizado por su alta intensidad de campo magnético. Esto se ilustra en el centro de la parte inferior de la Fig. 6.16.

Con la intención de extender a los modelos ESRF-EBS de 16 celdas la idea del LGB con súper imán en el centro, se optimizó una celda con un súper imán en el centro. Para simular el LGB se dividió en tres secciones al dipolo central y en la parte media se colocó un súper-imán de 10 cm de longitud.

6.4.1. Primera modificación del ESRF-EBS con emitancia de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. usando un súper-imán

Se modificó el tercio central del dipolo-cuadrupolo de cada una de las 16 celdas del ESRF-EBS, usando un imán de alta intensidad conocido como súper bend. La Fig. 6.16 muestra funciones lineales y estructura de la celda, y el esquema de intensidades magnéticas donde se aprecia que el súper-bend alcanza intensidades de 4 T aproximadamente. Queda la posibilidad de reducir la emitancia del anillo ϵ_x incorporando dipolos RB. Partiendo de las condiciones anteriores, se obtuvo una circunferencia de 421.99 m. La emitancia es de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ y cromaticidades de -86.52 y -72.03 respectivamente. Al modelo se le agregaron sextupolos y después de una primera optimización se presenta una dinámica no lineal compleja como la sugiere la Fig.6.17.

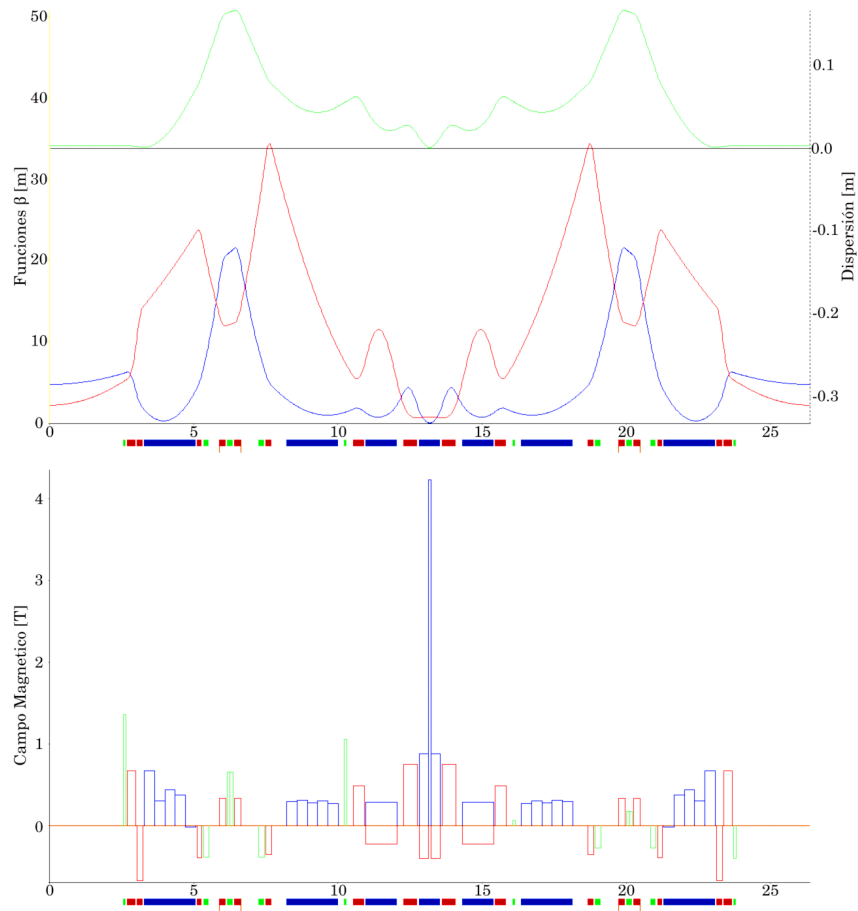


Figura 6.16: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) de la primera versión del ESRF-EBS con un imán de alta intensidad en el centro y emitancia es de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de referencia de 12.5 mm.

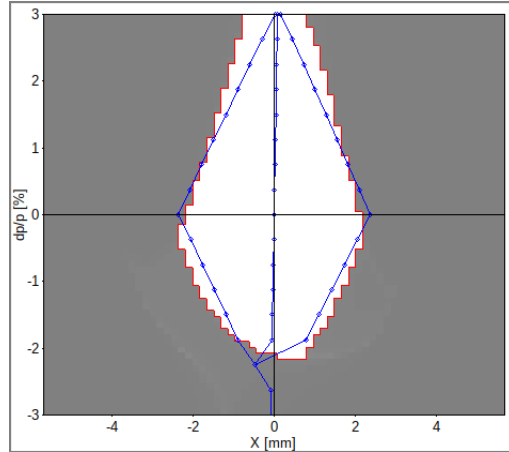


Figura 6.17: La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz en función de dp/p , del modelo primera versión ESRF-EBS modificado con super-imán con emitancia de $192 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.4.2. Segunda modificación del ESRF-EBS con emitancia de $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ usando un súper-imán

El modelo que ahora se describirá usando un súper-imán, procurará tener las funciones lineales muy parecidas al diseño europeo. Para ello se realizaron las siguientes modificaciones:

Se fragmentó el dipolo-cuadrupolo central en tres secciones y se ajustó la distancia de separación entre ellos. Otro criterio utilizado en la optimización fue pedir que las cromaticidades del anillo fueran valores pequeños y se utilizó este valor como -50 . Estas cromaticidad pequeñas reducen las intensidades de los cuadrupolos de la celda y ayudo a tener reducidos los picos de las funciones lineales, como se observa en la Fig. 6.18.

A diferencia del modelo anterior (6.4.1) la región de estabilidad de este modelo no está limitada en el rango de -3% a 3% de dispersión de momento, como lo muestra la Fig. 6.19. Esto puede atribuirse a que correcciones con sextupolos de cromaticidades pequeñas tienen efectos no lineales menores.

La emitancia del anillo aumentó a $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, debido en parte a la disminución del valor de la cromaticidad. También es de interés conocer cuánto cambia la estabilidad horizontal conforme la emitancia se reduce a valores cercanos a $100 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

El modelo puede seguir explorándose variando la longitud de los dipolos que se encuentran a un lado del súper-imán, para evaluar su potencial como una versión 9BA. Se espera que la optimización de este modelo lleve a emitancias pequeñas.

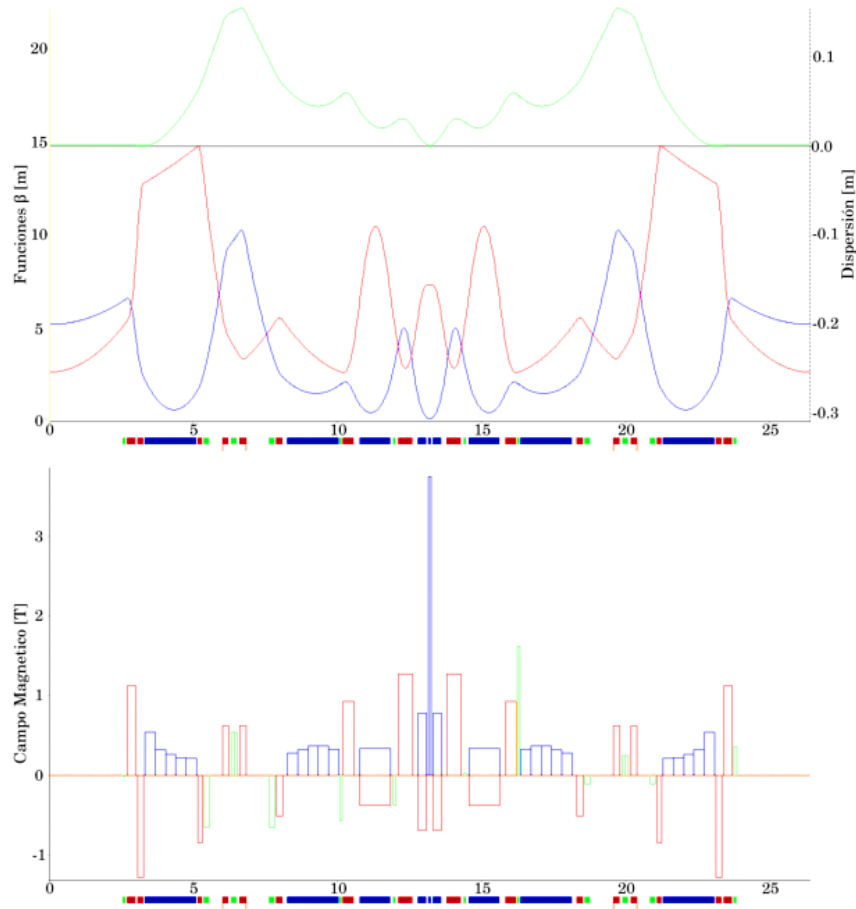


Figura 6.18: Funciones β_x , β_y y η (azul, rojo y verde) de la segunda versión ESRF-EBS modificado con súper imán en el centro, con emitancia de $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. En la imagen inferior se muestran las intensidades de los elementos magnéticos usando un radio de 25 mm.

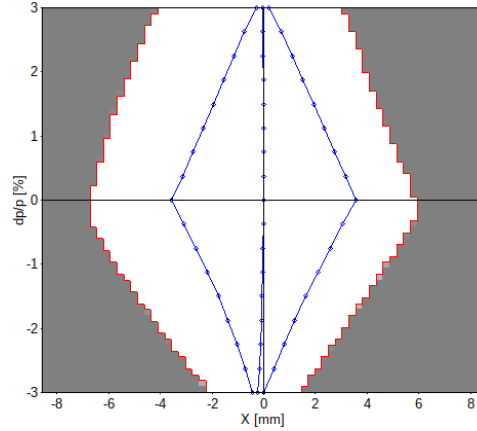


Figura 6.19: La figura muestra la zona de estabilidad horizontal del haz como función de dp/p , de la segunda versión ESRF-EBS modificado con superimán, de emitancia de $223 \text{ pm} \cdot \text{rad}$.

6.5. Recopilación de resultados de los modelos

En el Cuadro 6.1, las columnas representan parámetros principales que normalmente se analizan en los modelos, proporcionando una visión general. En la segunda columna se presentan los valores de la emitancia para cada modelo, un parámetro que se ha intentado minimizar durante las optimizaciones realizadas. En la penúltima columna se muestra la diferencia en el avance de fase horizontal y vertical, calculada entre las secciones de alta dispersión para cada modelo. Tener valores de avance de fase cercanos a 3π y π se relaciona con una mayor estabilidad en general y los modelos muestran esto con una optimización ligera efectuada con el programa OPA.

En la última columna del Cuadro 6.1 se presentan aperturas dinámicas satisfactorias cuando se cumple la transformación $-I$, que en el caso más general, se debe satisfacer que el avance de fase sea $(2n+1)\pi$ entre los picos de alta dispersión. El avance de fase adecuado se puede lograr mediante la optimización lineal, pero la optimización no lineal requiere de un esquema de sextupolos adecuado y de su optimización, que en nuestro caso solo se realizó con OPA.

Al considerar las optimizaciones con OPA, los modelos que cumplen con la transformación $-I$ presentan mejores propiedades dinámicas. En particular, los modelos 6.1.1, 6.2.1, 6.2.2,

6.4.1, y 6.4.2.

Se ha encontrado que los modelos HMBA, son más manejables en su dinámica no lineal cuando satisfacen la transformación $-I$ como anteriormente se ha considerado. El cuadro muestra que, cuando se cumple esta condición, se obtienen mayores aperturas dinámicas. No obstante, algunos modelos no están en el rango de emitancias deseado, ya que se busca estar por debajo de $100 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Los estudios de optimizaciones no lineales más profundos no se realizaron porque no estaba previstos en los objetivos iniciales de la tesis. Se propone, en una segunda etapa, explorar estos modelos en su dinámica no lineal para realizar una optimización más exhaustiva, para lo cual se utilizaran técnicas y programas que puedan abordar el problema no lineal.

Modelo	Emitancia natural ($\text{pm} \cdot \text{rad}$)	Cromaticidad x,y del anillo	No. Celdas	Circ. (m)	Betatron tunes	Momentum compaction factor	$\Delta\phi_x, \Delta\phi_y$	Estabilidad Horizontal a $dp/p = 0$ (mm)
6.1.1	137	-100.9, -81.5	32	843.979	75.61, 27.59	9.2×10^{-5}	$(2.9, 0.98) \pi$	6
6.1.2	118	-98, -79.9	32	843.979	76.70, 34.179	8.8×10^{-5}	$(3.11, 1.34) \pi$	2.5
6.2.1	273	-50.4, -40.6	16	421.984	37.809, 13.805	3.7×10^{-4}	$(2.98, 0.964) \pi$	6
6.2.2	115	-65.8, -51.3	16	363.232	39.096, 13.404	9.8×10^{-5}	$(2.92, 0.92) \pi$	4
6.3.1	80	-99.9, -74.3	18	445.381	59.384, 24.107	1.1×10^{-4}	$(4.64, 1.95) \pi$	1.5
6.3.2	224	-42.4, -46.7	16	392.097	39.442, 17.502	3.2×10^{-4}	$(3.4, 1.44) \pi$	4
6.3.3	75	-93.3, -65	16	425.966	54.86, 21.38	8.9×10^{-5}	$(4.9, 1.9) \pi$	2
6.4.1	192	-86.5, -72	16	421.99	40.28, 13.67	3.4×10^{-4}	$(2.9, 1.0) \pi$	2
6.4.2	223	-61.7, -45.4	16	422.32	39.31, 14.1	3.8×10^{-4}	$(3.1, 1) \pi$	5

Cuadro 6.1: Comparación de las características de los modelos estudiados, las casillas en rosa intenso se refieren a diseños más cercanos al original, en naranja están las primeras versiones 7BA con circunferencia aproximada de 400 m, en los cuadros verdes se agrupan los modelos que se caracterizan por tener celdas 9BA, y en morado los diseños que se contemplan un superbend en el centro de su celda. El avance de fase $\Delta\phi_{x,y}$ fue calculado entre los picos de dispersión alta en los modelos para una posible comparación con la transformación $-I$.

Capítulo 7

Discusión y conclusiones

En las fuentes de luz sincrotrón modernas, la reducción de la emitancia ha sido clave para el aumento de la brillantez y coherencia de la radiación. En este contexto, la actualización del sincrotrón europeo se ha destacado por su innovadora celda.

Adaptar el esquema del ESRF-EBS al contexto del sincrotrón mexicano implica realizar una exploración de posibles modelos aplicables. En este estudio, los resultados que se obtienen al emular el ESRF-EBS y los modelos derivados de ella muestran que el proceso de optimización utilizado para obtener la dinámica lineal es efectivo. Se realizaron las siguientes modelos: reproducción de la celda ESRF-EBS, modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS, modelos 9BA para el sincrotrón mexicano con 16 celdas tipo ESRF-EBS, y modelos para el sincrotrón mexicano con 16 celdas del ESRF-EBS con un súper imán en el centro.

En cuanto a la optimización de la dinámica no lineal, se observa que la zona de estabilidad encontrada en el modelo de emulación es la mitad de la del ESRF-EBS. Este resultado se atribuye al hecho de que los métodos empleados en la optimización de sextupolos se llevaron a cabo con programas menos precisos y con menor tiempo de procesamiento y poder de cómputo, en comparación con los métodos utilizados en el diseño conceptual del ESRF-EBS, donde la optimización se realizó de manera más robusta.

Se considera que existe la posibilidad de lograr una zona de estabilidad más amplia y, por consiguiente, una mayor apertura dinámica si se utilizan programas con mayor tiempo y

poder de cómputo, o algoritmos de cómputo diferentes.

Los demás modelos estudiados, derivados de la emulación de un modelo en funcionamiento, tienen una alta probabilidad de ser técnicamente realizables y por ello, se llevaron a cabo modificaciones que no comprometieran la estructura original del ESRF-EBS. La primera modificación debía mantener la celda 7BA, por lo que se decidió agregar dipolos RB para tener una optimización lineal más flexible al aumentar en número de ángulos de desviación en la celda.

Los modelos estudiados que usan los dipolos RB muestran una mejor zona estabilidad horizontal al minimizar la emitancia, que los modelos que se trataron de optimizar sin estos dipolos. Se ha considerado, además, que dentro de la cuarta generación de fuentes de luz sincrotrón es cada vez más difícil conseguir una amplia zona de estabilidad a medida que la emitancia se reduce.

La segunda modificación que se deriva del diseño del ESRF-EBS es en la dirección de aumentar el número de dipolos en la celda para obtener un diseño 9BA. El resultado obtenido fue una celda con emitancia menor, con una zona de estabilidad reducida que se acentúa a momentos mayores al 2 % los cuales no se corrigieron al realizar la optimización de los sextupolos con OPA.

Esto ha llevado a proponer la incorporación de dipolos RB al modelo 9BA, encontrando un modelo que por el valor de su emitancia se puede colocar en la cuarta generación de fuente de luz sincrotrón.

Hasta aquí concluye el reporte de la tesis, pero los estudios en el modelo 9BA con RB se han mantenido. Se ha tratado de comprender el proceso de la optimización de las intensidades de sextupolos explorando métodos propuestos en el grupo de trabajo. Esto implica buscar un punto de operación para el cual la función objetivo usada en el método de cuasi-invariantes [29] sea mínima cuando las intensidades de los sextupolos se toman con valor cero. Se espera que este estudio sea de utilidad dentro del proyecto de diseño del sincrotrón mexicano.

Bibliografía

- [1] S. Shin, “New era of synchrotron radiation: fourth-generation storage ring.,” *AAPPS Bulletin*, vol. 31(1), no. 2, p. 1–48, 2021.
- [2] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, and E. Levichev, “Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk,” *Physical Review Accelerators and Beams*, vol. 24, Dec. 2021.
- [3] G. Xu, Y. Jiao, and Y.-M. Peng, “Esrif-type lattice design and optimization for the high energy photon source*,” *Chinese Physics C*, vol. 40, p. 027001, feb 2016.
- [4] H. D. Sotelo, “Marco general para el desarrollo de un sincrotrón y la optimización elemental de de emitancia.” URL: <https://fis.unam.mx/pdfs/Tesis/Tesis%20HC3%A9ctor%20Dominguez.pdf>, 2015.
- [5] S.-Y. Lee, *Accelerator Physics*. World Scientific, second ed., 2019.
- [6] H. Winick, G. Brown, K. Halbach, and J. Harris, “Wiggler and undulator magnets,” *Physics Today*, vol. 34, p. 50–63, May 1981.
- [7] S. N. A. Laboratory, “Synchrotrons play role in nobel prize research.” <https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-10-12-synchrotrons-play-role-nobel-prize-research>, 2012, October 12.
- [8] “Opening of esrf-eps, a new generation of synchrotron.” <https://www.esrf.fr/home/news/general/content-news/general/>

opening-of-esrf-ebs-a-new-generation-of-synchrotron.html#:~:
text=25%20August%202020%20%E2%80%93%20A%20brilliant.

- [9] (n.d.), “EBS - Extremely Brilliant Source .” [www.esrf.fr.https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Accelerators/ebs---extremely-brilliant-source.html](https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Accelerators/ebs---extremely-brilliant-source.html).
- [10] S. Doniach, K. Hodgson, I. Lindau, P. Pianetta, and H. Winick, “Early work with synchrotron radiation at stanford,” *Journal of Synchrotron Radiation*, vol. 4, pp. 380–395, Nov. 1997.
- [11] C. SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, “History of the Stanford Synchrotron Radiation Lightsource.” <https://www-ssrl.slac.stanford.edu/content/about-ssrl/history-stanford-synchrotron-radiation-lightsource>.
- [12] “Esrfebs orange book.” https://www.esrf.fr/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf, Septiembre 2018.
- [13] Ahilles, “The unique skif project will provide russia with technological sovereignty for many decades.” URL: <https://en.topcor.ru/27613-unikalnyj-proekt-skif-obespechit-rossii-tehnologicheskij-suverenitet-na-mnogie.html>, 26 de Agosto. 2022.
- [14] Computer Network Information Center, Chinese Academy of Science, “Brief introduction–high energy photon source.” URL: <http://english.ihep.cas.cn/heps/ah/bi/>, 2022.
- [15] M. M. (Coordinador), *La fuente de luz de sincrotrón mexicana un proyecto para la transformación de la ciencia, la tecnología y la innovación*. Fondo de Cultura Económica, primera edición, 2019.
- [16] N. Méndez Cruz, “Estudio del modelo de sincrotrón suizo y su aplicación en el diseño del sincrotrón mexicano.” URL: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3344>, Noviembre 19. 2021.

-
- [17] E. D. A. and S. M. J., *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators*. Wiley-VCH, second ed., 1993.
- [18] S. H. S. Courant E. D., “Theory of the alternating-gradient synchrotron.,” *Annals of Physics*, vol. 3(1), no. 2, p. 1–48, 1958.
- [19] Andreas Streun, “Experimental methods of particle physics, particle accelerators.” URL: <https://ados.web.psi.ch/empp-streun/part1.pdf>, Oct. 2017.
- [20] Pikhartova, Helena, “Head-tail instability.” URL: <https://indico.cern.ch/event/684032/contributions/2806865/attachments/1604875/2546375/HeadTailInstability.pdf>, February. 2018.
- [21] S. Guiducci, “Chromaticity.” URL: <https://cds.cern.ch/record/398300/files/p191.pdf>, Sept. 1999.
- [22] A. Streun, “OPA Lattice Design Code.” <https://ados.web.psi.ch/opa/>, 2022.
- [23] K. L. Brown, “A second-order magnetic optical achromat.,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 26, no. 3, p. 3490–3492, 1979.
- [24] L. HOUMMI, *Study and Optimisation of the nonlinear and 6D dynamics of an electron beam in an ultra-low emittance storage ring*. PhD thesis, University of Liverpool, 2021.
- [25] L. Farvacque, N. Carmignani, J. Chavanne, A. Franchi, G. Le Bec, S. Liuzzo, B. Nash, T. Perron, and P. Raimondi, “A Low-Emittance Lattice for the ESRF,” in *4th International Particle Accelerator Conference*, p. MOPEA008, 2013.
- [26] V. S. Dyubkov, E. D. Tsyplakov, and T. V. Kulevoy, “Lattice options with reverse bending magnets for ussr hmbs storage ring,” p. 280–282, Sep 2021.
- [27] Robin, David , “Overview of the als upgrade.” URL: https://indico.bnl.gov/event/2938/contributions/7807/attachments/6991/8563/004_Robin_ALS-U.pdf, April 2017.

- [28] M. Dehler, A. Citterio, T. Garvey, M. Hahn, M. Negrazus, L. Schulz, A. Streun, and V. Vranković, “Conceptual design for sls-2,” *Proceedings of the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources*, vol. FLS2018, p. China, 2018.
- [29] E. A. Sanchez, A. Flores, J. Hernandez-Cobos, M. Moreno, and A. Antillón, “A novel approach using nonlinear surfaces for dynamic aperture optimization in mba synchrotron light sources,” *Scientific Reports*, vol. 13, Dec. 2023.

Apéndice A

Archivo de entrada de ESRF-EBS para OPA

```
{ D:\ESRF\esrf.opa }
```

```
{----- Global parameters (units: GeV, m, rad) -----}
```

```
Energy = 6.000000;
```

```
BetaX   = 5.2; AlphaX   = 0.0000000;  
EtaX    = 0.000000; EtaXP = 0.0000000;  
BetaY   = 2.4; AlphaY   = 0.0000000;  
EtaY    = 0.0000000; EtaYP = 0.0000000;  
OrbitX  = 0.00000000000; OrbitXP = 0.00000000000;  
OrbitY  = 0.00000000000; OrbitYP = 0.00000000000;  
OrbitDPP= 0.00000000000;
```

```
{----- Table of elements (units: m, m-2, deg, T; mm, mrad) -----}
```

```
{      Conventions: Quadrupole: k>0 horizontally focusing      }  
{      Sextupole : k=m*1, m:=Bpoletip/r2/(B*rho)      }
```

```
{D1      : Drift, l = 2.55,      ax = 5.00, ay = 5.00;} {2.7 - 0.15}
```

D1 : Drift, l = 2.55, ax = 5.00, ay = 5.00; {2.7 - 0.15}
D2 : Drift, l = 3.5266e-01, ax = 5.00, ay = 5.00;
D3 : Drift, l = 0.05 , ax = 5.00, ay = 5.00;
D4 : Drift, l = 0.05 , ax = 5.00, ay = 5.00;
D5D6 : Drift, l = 0.6857, ax = 5.00, ay = 5.00; {9.3570e-01 - 0.25}
D7D8 : Drift, l = 0.054, ax = 5.00, ay = 5.00; {(30.8e-2 - (SF1+SF2))/2}
D9D10 : Drift, l = 0.54739, ax = 5.00, ay = 5.00; {7.9739e-01 - 0.25 }
D11 : Drift, l = 1.6516e-01, ax = 5.00, ay = 5.00;
D12 : Drift, l = 0.068845, ax = 5.00, ay = 5.00; {(2.3769e-01 - 0.1)/2}
D13 : Drift, l = 6.2590e-02, ax = 5.00, ay = 5.00;
D14 : Drift, l = 1.2916e-01, ax = 5.00, ay = 5.00;
D15 : Drift, l = 0.05391, ax = 5.00, ay = 5.00; {(2.0782e-01 - 0.1)/2}

QF1 : Quadrupole, l = 0.295, k = 2.89400e+00, ax = 5.00, ay = 5.00; {2.9885e+00}
QD2 : Quadrupole, l = 0.212, k = -3.03339e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;
QD3 : Quadrupole, l = 0.162, k = -2.57070e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;
QF4 : Quadrupole, l = 0.212, k = 2.58020e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;
QD5 : Quadrupole, l = 0.212, k = -2.99490e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;
QF6 : Quadrupole, l = 0.388, k = 4.5190e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;
QF8 : Quadrupole, l = 0.484, k = 4.4390e+00, ax = 5.00, ay = 5.00;

DQ1 : Bending, l = 1.078, T = 1.6460e+00, k = -1.6451e+00,
T1 = 0.823, T2 = 0.823;
DQ2 : Bending, l = 0.720, T = 1.0198e+00, k = -2.1815e+00,
T1 = 0.5099, T2 = 0.5099;

A1 : Bending, l = 0.3576, T = 2.4303e-01, K = 0.00,
T1 = 0.121515, T2 = 0.121515;
A2 : Bending, l = 0.3576, T = 2.6979e-01, K = 0.00,
T1 = 0.00, T2 = 0.00;
A3 : Bending, l = 0.3576, T = 2.9718e-01, K = 0.00,
T1 = 0.00, T2 = 0.00;
A4 : Bending, l = 0.3576, T = 3.4869e-01, K = 0.00,
T1 = 0.00, T2 = 0.00;

```

A5   : Bending, l = 0.3576, T = 5.9525e-01, K = 0.00,
      T1 = 0.297625, T2 = 0.297625;

B1   : Bending, l = 0.3576, T = 2.4303e-01, K = 0.00,
      T1 = 0.121515, T2 = 0.121515;

B2   : Bending, l = 0.3576, T = 2.6979e-01, K = 0.00,
      T1 = 0.00, T2 = 0.00;

B3   : Bending, l = 0.3576, T = 2.9718e-01 , K = 0.00,
      T1 = 0.00, T2 = 0.00;

B4   : Bending, l = 0.3576, T = 3.4869e-01, K = 0.00,
      T1 = 0.00, T2 = 0.00;

B5   : Bending, l = 0.3576, T = 5.5648e-01, K = 0.00,
      T1 = 0.27824, T2 = 0.27824;

SD1  : Sextupole, L = 0.2, K = -58.627522, N = 4;
SD2  : Sextupole, L = 0.2, K = -73.741188, N = 4;
SF1  : Sextupole, L = 0.1, K = 69.555815, N = 4;
SF2  : Sextupole, L = 0.1, K = 93.000388, N = 4;
S3a  : Sextupole, L = 0.1, K = -27.558374, N = 4;
S3b  : Sextupole, L = 0.1, K = -6.777936, N = 4;
S4a  : Sextupole, L = 0.1, K = 0, N = 4;
S4b  : Sextupole, L = 0.1, K = 0, N = 4;
S5   : Sextupole, L = 0.1, K = 0, N = 4;
S6   : Sextupole, L = 0.1, K = 0, N = 4;
S7a  : Sextupole, L = 0.1, K = 53.308582, N = 4;
S7b  : Sextupole, L = 0.1, K = -17.282419, N = 4;
S8a  : Sextupole, L = 0.1, K = -1.964228, N = 4;
S8b  : Sextupole, L = 0.1, K = -13.932665, N = 4;

O1   : Octupole, L = 0, K = -98.654, N = 4;
O2   : Octupole, L = 0, K = -98.654, N = 4;
{----- Table of segments-----}

A    : A1, A2, A3, A4, A5;
DB   : B1, B2, B3, B4, B5;

```

TBA : D1, S7a, D3, QF1, D2, QD2, D3, -A, D4, QD3, D4, SD1, D5D6, O1, QF4, D7D8,
SF1, SF1, D7D8, QF4, O1, D9D10, SD1, D3, QD5, D11, DB, D12, S8a, D12;
TBA1 : D1, S7b, D3, QF1, D2, QD2, D3, -A, D4, QD3, D4, SD2, D5D6, O2, QF4, D7D8,
SF2, SF2, D7D8, QF4, O2, D9D10, SD2, D3, QD5, D11, DB, D12, S8b, D12;
MLD : QF6, D13, DQ1, D14, QF8, D15, S3a, D15;
MLD1 : QF6, D13, DQ1, D14, QF8, D15, S3b, D15;
CELL : TBA, MLD, DQ2, -MLD1, -TBA1;
RING : 32*CELL;



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



79
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CONTROL ESCOLAR DE LICENCIATURA



VOTOS DE APROBATORIOS

**SECRETARIA EJECUTIVA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

PRESENTE

Por medio del presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el **C. VILLARREAL MIRANDA HARIM JOSAFAT** con número de matrícula **10021457** cuyo título es:

Extensión del modelo ESRF-EBS al diseño del sincrotrón mexicano

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **LICENCIADO EN CIENCIAS ÁREA TERMINAL EN FISICA**

Cuernavaca, Mor a 11 de junio de 2024

Atentamente
Por una humanidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DR. JOAQUIN ESCALONA SEGURA	(PRESIDENTE)
DR. MARCO ANTONIO RIVERA ISLAS	(SECRETARIO)
DR. ARMANDO ANTILLÓN DÍAZ	(VOCAL)
DR. ROLANDO PÉREZ ÁLVAREZ	(SUPLENTE)
DR. OLMO GONZÁLEZ MAGAÑA	(SUPLENTE)

MIE/VRRC/eae



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3270 / correo certificados.titulacionesiicba@uaem.edu.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ROLANDO PEREZ ALVAREZ | Fecha:2024-06-13 09:47:45 | FIRMANTE

cbPpqPxJNEKdyDU3DZGgeBmLCEGucP4/dqZQlywN9o2qPhhD8lsbko+sVAMfDbM1gEbaccq5A5UoxjYlcA0BPrr7XcBZ+rxhd1+xixSGXCLvdNTkxjQDZmUJPCWLYneWmULziTwTJL0JmjxPO1v6W7skC8hrO+FE4TP/J5aHklq8yKUa1tAR+zuUnSOKD4e3av0nUoJo7QEG2SsL1sL4Xno0sPXUAXXQ40UCkwbO2iUim/BPZ/koVyW5qcKy84tbdFK9NU4vL+qpmwa9/4ncoojAStvzV8zMI8mwof6mgqlqa8u+Ot8nubs0LII9OVMtiKrf6SE2SIIknBvccsnpSQ==

JOAQUIN ESCALONA SEGURA | Fecha:2024-06-13 09:47:59 | FIRMANTE

CEN58sjhN6peQ/gENTQ2X1cbxgZeDPdnEE3s8tpQM5z0UD2Ox5ScvXKeS660JReqnYaxoxEnEGiSjMxN1RaqjSWF7ielT9L98fJZASVR9JQxJPapBcCiLOv2cDiLaiJUfxji07Zzz4jHEhXGxnl/NWAZffd1kFP+SbOF0eMo2+SnVn0EokikoaRKqZ9uoQFj4l2oAQmSy4chgaD0GsuUA/DyIRPLKMc4Z6vbvyrCEQoHj8QWkfaGucuwNJyso9Rg7thqw09r3FZPym+RmRdaAPmZo4zBW5iCNC715CbRzkSdlqT/92bXzfM1dTfM5TEBgeI9sSIzPBpC39hkrq==

MARCO ANTONIO RIVERA ISLAS | Fecha:2024-06-13 09:52:58 | FIRMANTE

bqHlIm9bp97GKjUj4EpZIVCua8v07cdy4pdmgnVVHv9+Cux3shT06/euilhNgghHDQBIXODqF/ZjbSF8PsYW9GLE75rfNFnuJoaELIUWeMQJ7R2Zt2z5PuXAXtqh7oUX5F0HQ8/OgSwyoL26PK6Mv6xPxcRRxvUrryt7AQlghGzcDDHrrBTF3Gto/Q6xBzv74dHreR/OykyxDu4GdXmNbgBy2uNhTrMGr2bz0NebPG2aF8C/93tta6hi1hhPfeOha3pcqyWQuN6zGV7icf6UxOYIL5yU1Z0G/mZ8dPSG04r9gszQXDMeq1ZpWDyxyqG/zgs1jrrMQAnYESVow==

OLMO GONZÁLEZ MAGAÑA | Fecha:2024-06-13 10:06:59 | FIRMANTE

rJJ9+NyZ+QADBRCwyKbciX9QQ0hgzm5TzVGHkX4hHMi/Ni/DbwdzAMhDFQN7XkG4RmB8V/eHugKsNKjI2oKF5SOKJmHxXk8p0eckPaMtXc0hk24ZtwNQrfI092Nr9mTdmrpQdj bKRRuuLQBjFvWzKGCzFOZg3F7fBLxYCTsXmHC9Ft1LHzkD62Xc2L3Fz25X5z3cKp7AlsUBGpWq11reQwqQuIB9Po5d0XtuUB5D+MaFiCXzJiUDBephJTeV8ffA8kJ/PCMONk1cSFYaUWS0P04nJBuJ/cTra1ulKegyLeiPKIIMPhqKBWJjfH3ZyT0HQ9s17ic746eJ7AWLjA==

ARMANDO ANTILLÓN DÍAZ | Fecha:2024-06-13 10:29:35 | FIRMANTE

fIzhqqXmn4gNoiH6Y6HgceE+vZLhTT0NpzbEeMNOKv83xLN3ZATwpxA6w/+Aq+nhKNICN3oujZzPqFjL7grtCJRIUOTH7MvXCbc7M2NvVgJgSjLs2rk2FeF278VeXmaj7FWD bujCuQ7F9BJVaQXmHLv0XIDeWb7+tJ2XJ5zTLks+rr7tdmfNBhVzT4xn9GhTKm05Wx8TemXRacQUHRbRNL5kqM4yepnQOWHLidaA5NJJ24f6T1LgV1aaJO6jGJUUYnBIR+Npcw+wJJA5TA03cG6AlyXofMXeZw+2AD6OtnQI4A3JPTOmsKz0mVY0ShqCXCB+8esOEPur/TAvijg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



W6USKfKtO

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/dj3N53TBsCt36EknR4RT42dw77sIXzx2

