



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

Editores:

Dr. Matías Moreno

Coordinador de Proyecto

Dr. Armando Antillón

Dr. José Jiménez

Dr. Tomás Viveros

Integrantes del Grupo de Trabajo

IF. Rodolfo Leo

Dr. Juan Reyes

Dr. Alain Flores

MC. Agustín Torres

Informe Final del Proyecto

“Plan estratégico para la construcción y operación de un sincrotrón en Morelos”

Datos Generales

Se presenta el informe técnico del proyecto Fomix Conacyt-Morelos “**Plan Estratégico para la construcción y operación de un Sincrotrón en Morelos**”, con clave **224392**, suscrito entre el **Estado de Morelos** y el **Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México**. El IFUNAM designó al Dr. Fernando Matías Moreno Yntriago como Responsable Técnico del mismo y al C.P. Marco Antonio Mostalac León como Responsable Administrativo. Este proyecto se llevó a cabo entre el 17 de septiembre de 2014 y el 30 de marzo de 2016.

En apoyo a la parte técnica del proyecto se constituyó un **Grupo de Trabajo** con los siguientes participantes iniciales

- Dr. Armando Antillón, Instituto de Ciencias Físicas, UNAM.
- Dr. Matías Moreno, Instituto de Física, UNAM.
- Dr. José Mustre de León, Cinvestav, Mérida.
- Dr. José Ignacio Jiménez Mier y Terán, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
- Dr. Mauro Napsuciale, Campus León, Universidad de Guanajuato
- Dr. Tomás Viveros García, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa

Parte integral del trabajo de este proyecto se integró con el siguientes equipo

- Ing. Rodolfo Leo Méndez
- Dr. Alain Flores Tlalpa

- M. en C. Mario Agustín Torres Oviedo
- Dr. Juan Reyes Herrera
- M. en C. Edgar Andrés Sánchez García

Resumen Ejecutivo del Proyecto

[Para motivos de la presentación de una cuartilla ver la sección IV: Objetivo del Proyecto Fomix-Morelos]

I. Introducción

Las fuentes de luz sincrotrón son una herramienta científica y tecnológica con un enorme potencial para la innovación. No en balde todos los países con economías más desarrolladas o comparables con la mexicana tienen uno o más laboratorios de este tipo. El número de laboratorios de luz sincrotrón en Estados Unidos, Alemania y Japón es de un laboratorio por cada veinte millones de habitantes. Los laboratorios dedicados exclusivamente a la producción de este tipo de luz se han multiplicado a partir de la década de 1970.

Una fuente de luz sincrotrón tiene las siguientes características:

1. Produce una luz extremadamente brillante, miles a millones de veces más brillante que la luz del sol, en un intervalo de frecuencias que va desde el infrarojo hasta los rayos X.
2. Esta luz es depositada en una región muy pequeña de la muestra que analiza lo que permite hacer estudios localizados en la misma.
3. El haz de electrones que produce la luz de sincrotrón es pulsado lo que permite hacer estudios con resolución temporal de orden de picosegundos y aún femtosegundos en las fuentes más avanzadas.
4. Los desarrollos recientes en ciencia de aceleradores permiten la producción de haces de luz coherentes que brindarán un número de aplicaciones importantes y

novedosas. En este sentido la construcción en el corto plazo de una fuente de luz brinda una ventana de oportunidad para el país que se decida a emprender tal empresa.

Las aplicaciones de las fuentes de luz sincrotrón van desde la física nuclear al desarrollo de materiales y la espectroscopia de macromoléculas de interés biológico. La versatilidad y el número de aplicaciones a múltiples áreas de la investigación científica y tecnológica ha ido en acenso desde 1960 cuando los aceleradores de electrones construidos para hacer estudios de Física de Altas Energías permitieron el su uso a “experimentos parásitos” que utilizaban la luz de sincrotrón. Hoy en día hay en el mundo más de sesenta laboratorios construidos para y dedicados al uso de luz de sincrotrón.

Áreas enteras de la ciencia, la tecnología y la innovación de nuestros días dependen de las posibilidades fundamentales que estos laboratorios ponen a su alcance. En nuestro país hay más de una centena de investigadores que han utilizado estos laboratorios para realizar investigaciones, muchos de ellos lo hacen de manera sistemática.

La decisión de construir un laboratorio de este tipo en nuestro país, como muestran las experiencias recientes de España, Brasil, Australia y Jordania darían un gran impulso a un creciente número de áreas de investigación y desarrollo tecnológico. Pero de manera igualmente importante brindarían la posibilidad de generar desarrollos innovadores soberanos para nuestro país.

II Elementos esenciales de las fuentes de luz sincrotrón

Las fuentes de luz sincrotrón modernas diseñadas y puestas en marcha en los últimos veinte años son de dos tipos que llamaremos aquí de tercera y cuarta generación.

Las fuentes de luz de 3ª generación están constituidas básicamente por un anillo de acumulación que almacena paquetes de electrones que giran en una trayectoria casi circular con secciones rectas. El diámetro típico de este anillo es de decenas a cientos de metros. Este haz de electrones produce la luz al ser acelerado por dos tipos de imanes, los imanes que lo fuerzan a mantenerse en la órbita circular del anillo y aquellos dispositivos de inserción que se colocan en los segmentos rectos

del anillo. Estos últimos son los que emiten una luz más brillante y le dan el carácter de 3ª generación al sincrotrón. Un laboratorio con un sincrotrón de 100 metros de diámetro puede llevar a cabo de manera simultánea decenas de experimentos que miden diversos procesos.

Las fuentes de 4ª generación son los láseres de electrones libres. De éstos existen sólo un puñado y se encuentran en proceso de depuración tecnológica. Sin embargo la brillantez de la luz lograda y la estructura temporal del pulso hacen que muchos de los laboratorios de 3ª generación estén diseñando actualizaciones para poder brindar una calidad de luz cercana a la de los láseres de electrones libres, de tal forma que ambos serán al final complementarios.

El elemento que define la calidad y el potencial científico y tecnológico de estos laboratorios son las características del haz de electrones. Éste se produce en las fuentes de luz de 3ª generación en tres pasos: i. un acelerador lineal de varias decenas de metros produce un haz pulsado de cientos de MeVs (millones de electrón-volts), ii. un impulsor circular en el que los electrones se llevan a la energía de diseño, típicamente de 2 a 8 GeV (giga electrón-volt), para ser inyectados en, iii. el anillo de acumulación.

La luz producida en el anillo de acumulación por los imanes deflectores y los dispositivos de inserción es en seguida conducida a las decenas de laboratorios que se arreglan alrededor del anillo de acumulación.

III Costos y logística.

Las fuentes de luz sincrotrón desarrolladas recientemente en España y Australia siguen caminos diferentes. El sincrotrón español fue construido buscando desarrollar una importante comunidad de científicos e ingenieros de aceleradores al tiempo que cuidaba el desarrollo de una comunidad de usuarios que retroalimentaron el diseño del sincrotrón. La experiencia australiana partió de una iniciativa de un premio Nobel local y tuvo suficientes recursos para, en esencia, adquirir una fuente de luz “llave en mano” dejando para una etapa posterior generar una comunidad de ingenieros y científicos de aceleradores. La ventaja de este último camino es que se puede llegar a usar la luz del laboratorio en un

mínimo de tiempo, el inconveniente principal es que eleva los costos de instalación de la fuente de luz en un 20% a 40 %.

Todavía distinta es la experiencia brasileña que iniciaron su proyecto a finales de la década 1980 generando un sincrotrón de 2^a generación, esto es sin dispositivos de inserción y con una calidad de luz relativamente baja para los estándares actuales. La ventaja principal de hacerlo así es que tuvieron la oportunidad de educar a una generación de científicos y técnicos que hoy están generando un proyecto de fuente de luz de 3^a generación innovador. Es importante definir una estrategia apropiada para nuestro país.

Es nuestra opinión que la estrategia apropiada para México está en algún punto entre la experiencia brasileña y la española. El proyecto representa además la oportunidad de desarrollar en México la tecnología de aceleradores. No existe en la actualidad en nuestro país investigación y desarrollo en esta área. La física de aceleradores es importante en muchos aspectos de la investigación básica así como de las aplicaciones tecnológicas.

Con una administración cuidadosa de recursos y teniendo en cuenta los costos de la inversión de la fuente española, de US\$320 millones, consideramos que una fuente en México debería costar entre US\$400 millones a US\$500 millones con costos de operación y desarrollo de los laboratorios de unos US\$60 millones por año durante los primeros diez años de operación. Es deseable iniciar la operación de estos laboratorios con sólo un cuarto a un tercio de las salidas de luz ocupadas, y dejar el resto de puertos para un desarrollo definido por las necesidades de la comunidad de usuarios durante los primeros diez años de operación.

La construcción de la fuente española es indicadora del tiempo que lleva la construcción y puesta a punto (llamada "comisionamiento") de una fuente de 3^a generación: alrededor de ocho años desde que la decisión política y la inversión económica fue otorgada. Una estimación basada en esos ocho años lleva a una inversión promedio de entre US\$60 y US\$80 millones por año.

Una vez completa la etapa de diseño y construcción se pasa a la de explotación y crecimiento de líneas experimentales. El objetivo es crecer en un par de líneas por año con una inversión de US\$25 a US\$30 millones y un costo de operación de US \$20 a US\$25 millones por año.

El tiempo de vida típico de una instalación de esta naturaleza es de 20 a 30 años al cabo de los cuales el recambio científico tecnológico requiere una actualización mayor.

IV. Objetivo del Proyecto Fomix-Morelos

Los países que han adoptado la vía de la sociedad del conocimiento encuentran conveniente construir una fuente de luz sincrotrón por cada 20 a 25 millones de habitantes. Lo que sugiere que una nación como México debería tener de cuatro a cinco fuentes de luz para estar a la altura de nuestros socios comerciales y pasar de un país con un desarrollo industrial basado en la manufactura a uno centrado en el conocimiento.

Un aspecto de central importancia en la definición de un proyecto de esta magnitud es contar con la supervisión y asesoría de un comité internacional de expertos de alta calidad y experiencia. La formación de este comité y el impulso decidido a la formación de recursos humanos en la ciencia y tecnología de aceleradores debería ser uno de los ejes de este proyecto. El otro eje es el apoyo a la formación de nuevos grupos de investigación que usarán esta instalación y al fortalecimiento de los ya existentes.

El objetivo central de este proyecto es definir con precisión las características centrales de la fuente de luz sincrotrón que debe ser construida para nuestro país, dos aspectos complementarios de la estrategia implícita en las demandas solicitadas a este proyecto son las características del complejo de aceleradores y líneas iniciales y, por otro lado, un estudio del modelo de negocios que la fuente de luz ofrecería.

El proyecto tiene entonces un carácter dual por un lado toma en cuenta que el objetivo esencial de una fuente de luz sincrotrón es producir conocimiento tanto básico como aplicado en ciencias físicas, químicas y biológicas y, por otro, proveer a las empresas de un instrumento ágil para probar sus diseños y optimizar sus procesos productivos.

En este contexto el proyecto se sitúa como un canal privilegiado para hacer converger el conocimiento y capacidad técnico científica desarrollada

principalmente a partir de los años 1930 en adelante en los centros de educación y educación superior con la capacidad e impulso del sector empresarial público y privado.

3. Resultados del Proyecto

3.1. Metas y Objetivos Alcanzados

Es conveniente separar los objetivos y metas del proyecto en los siguientes grandes rubros:

1. Diseño técnico del complejo de aceleradores y características generales del primer conjunto de laboratorios de líneas de luz
2. Plan de viabilidad y negocios
3. Cien casos de estudio de usos realizados entre la industria y fuentes de luz en el mundo
4. Eventos realizados con el apoyo del proyecto
 - i. Organización y participación en el 3er Taller Mexicano de Física de Aceleradores (3rd Mexican Workshop on Acelerador Physics) realizado de manera coordinada con la 4a Reunión de Usuarios Mexicanos de Radiación Sincrotrón (4th Mexican Synchrotron Radiation Users Meeting, RedTULS) organizado con la RedTULS, Huatulco, Oax. 27 al 29 de noviembre 2014
 - ii. Participación en el Foro "¿Hacia dónde va la Física? Mesa sobre el Sincrotrón", organizado por el Consejo Consultivo de las Ciencias. México, D.F. 8 de abril 2015.
 - iii. Organización y participación en la Conferencia "Grandes Proyectos Científicos Mexicanos El Sincrotrón", en colaboración con El Colegio Nacional, el Consejo Consultivo de las Ciencias, el Instituto de Física de la UNAM y la Secretaría de Innovación Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos. Sede de El Colegio Nacional, México, D.F. 23 y 24 de junio de 2015.
 - iv. Coorganización y participación en la 5a Reunión de Usuarios Mexicanos de Radiación Sincrotrón (5th Mexican Synchrotron Radiation Users Meeting) coorganizado con la RedTULS, Cuernavaca, Mor., Agosto 2015.
 - v. Coorganización y participación en el Foro "México hacia el Salto Tecnológico y Científico: El Sincrotrón" del Senado de la República, Sede del Senado de la República, México, D.F. 30 de Septiembre de 2015.
 - vi. Visita al
 - European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) en Grenoble, Francia del 17 al 21 de noviembre de 2015

- Sincrotrón español ALBA, Barcelona, España, coorganizado con la RedTULS, 21 al 25 de noviembre de 2015.
- vii. Visita a los laboratorios estadounidenses:
- Brookhaven National Laboratory, National Synchrotron Light Source II (NSLS II), Brookhaven, NY. Febrero 28 a marzo 1o, 2016
 - Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source (APS), Argonne, IL, Marzo 1 a 3 de 2016
 - Lawrence National Laboratory, Advanced Light Source (ALS), Berkeley, Calif. Marzo 3 a 5, 2016
 - Stanford Linear Accelerator Center, Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL), marzo 5 a 7 de 2016
- viii. Reunión Desayuno Empresarial "El Sincrotrón en la Industria", Club de Banqueros, Cd. de México, CDMX, 15 de marzo de 2016.
- ix. Otras acciones

El detalle de las acciones mencionadas en cada punto de esta lista se incluye en los anexos de este informe.

Se da a continuación un resumen de algunos aspectos sobresalientes en cada rubro con el señalamiento de que los diferentes temas están íntimamente relacionados entre sí y que por tanto la separación presentada requerirá referencias cruzadas entre los temas tratados

1. El diseño técnico del complejo de aceleradores requiere una evaluación del número actual de usuarios y también de la conveniencia a nivel del país de tener una instalación de gran envergadura como la indicada en el Resumen del Proyecto, En el país hay unos 160 investigadores que han usado en los últimos años fuentes de luz sincrotrón (FLS), de ellos una tercera parte son usuarios académicos sistemáticos y el resto coyunturales de estas instalaciones. Si hay industrias mexicanas que requieran de FLS no es posible determinarlo con la metodología hasta ahora seguida. Es posible que entre las industrias cementera, agroalimentaria, farmacéutica, metalúrgica y de hidrocarburos se hayan realizado estudios de manera directa o a través de firmas consultoras pero en este caso no hay información pública o el esfuerzo de este proyecto no ha alcanzado para encontrarla.

En todo caso el número de usuarios y su capacidad es comparable o superior a la de países que en su momento decidieron hacerse de una FLS nacional, casos emblemáticos son el brasileño y el español. La experiencia es que una vez tomada la decisión de construir una fuente de luz el número de usuarios crece en un factor de diez en el período de construcción hasta llegar a unos 300 o cuatrocientos usuarios en el caso español y a unos cien en el

brasileño. Las diferencias entre los dos casos se pueden trazar a la decisión de tener o no tener líneas de luz en FLS en el extranjero empezando con la construcción de las FLS nacionales. Esto es claro de los estudios de viabilidad y de las visitas a laboratorios en el extranjero realizadas por este proyecto.

En base a este criterio y considerando el potencial científico, tecnológico y de innovación que una FLS este proyecto recomienda la construcción de una FLS mexicana con las siguientes características:

- i. Una energía no inferior a 3 GeV en el anillo de acumulación de electrones
- ii. Una circunferencia de cercana a 400 metros en este anillo
- iii. Una emitancia menor a 1 nm.rad

Puntos adicionales que fueron considerados en esta decisión incluyen:

- a. El tiempo de diseño y construcción permite un margen de acción para consolidar la comunidad de usuarios
 - b. El país ha pospuesto la creación de esta instalación por lo que no puede permitirse un retraso adicional construyendo una FLS que no tenga posibilidades de competir con las de nuestros socios comerciales. Hacerlo de otra manera llevará a una inversión menos redituable tanto en aspectos puramente científicos como en el impacto económico de esta instalación,
 - c. El mayor compromiso implícito en la selección de la energía de los electrones es el no tener disponible en la mayoría de las líneas de luz experimentales rayos X duros, si bien hay aplicaciones importantes, como en las ciencias médicas, éstas se pueden solventar con dispositivos de inserción o con imanes super-deflectores. Un diseño técnico detallado deberá considerar la posibilidad de tener más de una energía del haz de electrones.
 - d. La principal limitación de la circunferencia escogida es en el número total de líneas experimentales disponibles, esta selección fue tomada por razones del monto de la inversión inicial requerida que crece de manera aproximadamente lineal con el tamaño de la circunferencia. Un error en esta estimación será detectable sólo después de que la FLS esté saturada en todas sus líneas de luz experimentales, lo que no se espera en los primeros diez años de funcionamiento, en todo caso una demanda creciente se podría mitigar con el uso múltiple de cada una de las líneas de luz.
2. El plan de viabilidad fue contratado externamente con el Dr. Víctor del Río, su trabajo involucró un estudio comparativo de cuatro sincrotrones:
- a. SESAME que es un sincrotrón regional patrocinado por la UNESCO y que congrega con un modelo inspirado en el CERN a varios países de medio oriente que incluyen a Israel, Jordania, Egipto, Irak y Turquía. Se espera que esta instalación vea su primera luz este 2016.

b. ALBA, la FLS española que que comisionada en 2011. Se trata de una FLS de tercera generación con un diseño e implementación excelentes para el monto de la inversión

c. LNLS, el Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón de Brasil que se inauguró en 1997 como un sincrotrón hecho en casa, con pocas líneas experimentales y, naturalmente, sin dispositivos de inserción. De tal suerte que Brasil esta hoy en día construyendo un nuevo sincrotrón de última generación ($E= 3 \text{ GeV}$, 518 m de circunferencia y emitancia 0.28 nm.rad)

d. El Sincrotrón Australiano, puesto en marcha a mediados de la década pasada como un proyecto del estado de Victoria (3 GeV, 216 m de circunferencia, 10 nm.rad de emitancia).

Es un proyecto en buena medida hecho llave en mano.

Las experiencias, costos y posibilidades de estos proyectos recientes, así como los importantes retos que tuvieron que vencer estos proyectos son una lección importante para tomar en cuenta en el diseño y construcción de la FLS mexicana. El amplio estudio concluye que una FLS mexicana es no sólo viable, conveniente y necesaria sino urgente.

3. Un entregable no incluido en el proyecto inicial es el estudio de ejemplos de usos industriales de las FLS. Para este efecto se conformó un pequeño grupo que se autodenominó "Oficina de Vinculación Industrial" (OVI). Formado por el M. en C. Mario Torres y el hoy Dr. Juan Reyes, coordinados por el Dr. Matías Moreno y apoyados por el Ing. Rodolfo Leo. Este grupo tuvo el soporte técnico del Departamento de Diseño del IFUNAM.

El objetivo básico del subproyecto fue seleccionar 100 ejemplos de usos industriales de las FLS. De los más de 4000 usos encontrados se seleccionaron 100 y a cada uno de estos se les hizo una ficha informativa. Con la información recabada y aumentada se recomienda hacer una base de datos para su uso por empresas.

4. Eventos

i. Organización y participación en el 3er Taller Mexicano de Física de Aceleradores (3rd Mexican Workshop on Acelerador Physics) realizado de manera coordinada con la 4a Reunión de Usuarios Mexicanos de Radiación Sincrotrón (4th Mexican Synchrotron Radiation Users Meeting, RedTULS) organizado con la RedTULS, Huatulco, Oax. 27 al 29 de noviembre 2014.

Se destaca de esta reunión dos aspectos. La colaboración con la Red Temática de Usuarios de Luz Sincrotrón y la recomendación de tres destacados invitados: Robert Hettel, SSRL, Riccardo Bartolini, Diamond la FLS británica y Francis Pérez de ALBA en el sentido de centrar el diseño de la FLS mexicana en 3 GeV de energía, 300 m de circunferencia y 300 pm.rad de emitancia.

- ii. Participación en el Foro "¿Hacia dónde va la Física? Mesa sobre el Sincrotrón", organizado por el Consejo Consultivo de las Ciencias. México, D.F. 8 de abril 2015.

De nuevo hay una importante sinergia entre la RedTULS y el proyecto Sincrotrón en Morelos. Se concluye de la reunión con una visión de objetivos comunes y se presenta a la CCC un documento con elementos importantes para la toma de decisiones.

- iii. Organización y participación en la Conferencia "Grandes Proyectos Científicos Mexicanos El Sincrotrón", en colaboración con El Colegio Nacional, el Consejo Consultivo de las Ciencias, el Instituto de Física de la UNAM y la Secretaria de Innovación Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos. Sede de El Colegio Nacional, México, D.F. 23 y 24 de junio de 2015.

Este es sin duda un evento que marca un antes y un después en el desarrollo del proyecto. Se logra tener un evento de alta calidad académica, con repercusión en los medios de comunicación y con incidencia en el Senado de la República. La presencia en el Foro de la Dra. Julia Tagüeña, Directora Adjunta de Desarrollo Científico y del Dr. Enrique Cabrero, Director General de Conacyt con el anuncio de los recortes al presupuesto federal causa cierto desazón pero el ímpetu que se logra con el apoyo de un sector relevante del Senado a la larga define una ruta importante para el futuro de la FLS mexicana. Con el apoyo del Dr. Octavio Novaro, miembro de El Colegio Nacional, se procurará reunir en un libro las contribuciones académicas al Evento.

- iv. Coorganización y participación en la 5a Reunión de Usuarios Mexicanos de Radiación Sincrotrón (5th Mexican Synchrotron Radiation Users Meeting) coorganizado con la RedTULS, Cuernavaca, Mor., Agosto 2015.

Además de el éxito de convocatoria se destaca la presencia del Gobernador de Morelos, Lic. Graco Ramírez, refrendando el apoyo a la construcción de una FLS mexicana en el Estado de Morelos.

- v. Coorganización y participación en el Foro "México hacia el Salto Tecnológico y Científico: El Sincrotrón " del Senado de la República, Sede del Senado de la República, México, D.F. 30 de Septiembre de 2015.

Durante el Foro se logra la participación de senadores de múltiples corrientes políticas. Esto consolida un acuerdo pluripartidista para que el Senado de la República realice un exhorto a la Cámara de Diputados para incluir en el Presupuesto de Egresos de la Federación la partida para hacer el Diseño Técnico Detallado y el Proyecto Ejecutivo de Ingeniería y Arquitectura del Sincrotrón Mexicano,

- vi. Visita al

- European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) en Grenoble, Francia del 17 al 21 de noviembre de 2015

Se asiste a la conferencia de la FLS Africana y durante el día 21 de noviembre se tiene

una reunión conjunta entre los representantes mexicanos y los directores del ESRF encabezados por el Dr. Francesco Sette. Se establece la posibilidad de tener un convenio de colaboración y de apoyo a la construcción de una FLS mexicana. Dos posibilidades no excluyentes se presentan: contar con una línea mexicana en ESRF y que México sea miembro asociado o socio del ESRF. En principio el ESRF estaría dispuesto a pertenecer al Comité Científico de la FLS mexicana.

- Sincrotrón español ALBA, Barcelona, España, coorganizado con la RedTULS, 21 al 25 de noviembre de 2015.

Como en el caso del ESRF la posibilidad de colaborar se logra en términos similares, la diferencia estructural más importante es que al ser ALBA un sincrotrón nacional no existe la figura de socio. Sin embargo, las condiciones estarían dadas para una colaboración semejante a la mencionada antes para ESRF. También los directivos de ALBA ven positivamente pertenecer al Comité Científico de la FLS mexicana.

En una acción paralela se contacta a la firma de Arquitectura e Ingeniería que diseño y coordinó la construcción de ALBA: Master S.A. Esta reunión permite profundizar la propuesta que se entrega en este informe en lo que toca a las características del complejo de aceleradores y también de los requerimientos de la instalación civil de la futura FLS mexicana.

vii. Visita a los laboratorios estadounidenses:

- Brookhaven National Laboratory, National Synchrotron Light Source II (NSLS II), Brookhaven, NY. Febrero 28 a marzo 10, 2016
- Argonne National Laboratory, Advanced Photon Source (APS), Argonne, IL, Marzo 1 a 3 de 2016
- Lawrence National Laboratory, Advanced Light Source (ALS), Berkeley, Calif. Marzo 3 a 5, 2016
- Stanford Linear Accelerator Center, Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL), marzo 5 a 7 de 2016

La posibilidad de entrenar y colaborar con los distintos laboratorios estadounidenses visitados es semejante a la descrita para ALBA. En todos ellos se abre de manera explícita la posibilidad de colaborar en la construcción de una línea y de llevar a personal mexicano a entrenarse en sus instalaciones. El caso de ALBA y del NLSL II son similares en tanto que ambos laboratorios tienen un gran número de líneas por ser diseñadas y/o en diferentes etapas de desarrollo. Esta posibilidad también existe, pero con un matiz distinto en los laboratorios APS y ALS ya que ellos, de manera semejante a ESRF, tienen planes de actualización de sus instalaciones para llevarlas a menores emitancias. Sin embargo, a diferencia de ESRF los laboratorios APS y ALS no tienen aprobado el presupuesto para dicha actualización. Por último, el laboratorio SLAC del

cual es parte el SSRL tiene también asociado el único Láser de Electrones Libres en operación con acceso a Rayos X lo que brinda una oportunidad excepcional para la comunidad científica mexicana.

viii. Reunión Desayuno Empresarial "El Sincrotrón en la Industria", Club de Banqueros, Cd. de México, CDMX, 15 de marzo de 2016.

A esta reunión asistieron una proporción semejante de empresarios y de funcionarios-académicos. Se hicieron un par de propuestas importantes para crear fondos para impulsar el involucramiento de los empresarios mexicanos en la FLS. Por un lado el Ing. Torres propuso la creación de un fondo en donde industrias mexicanas inviertan un 0.1 a 0.5 % de sus ganancias en un fondo que permita desarrollar las aplicaciones de empresas mexicanas en las tecnologías asociadas a FLS. Otra propuesta fue que Conacyt u otra instancia gubernamental promueva 50 becas anuales para el desarrollo de los recursos humanos asociados a la FLS mexicana. Finalmente el Dr. Francisco Barnés, impulsó la idea de que Conacyt destine recursos para enviar a técnicos nacionales a sincrotrones en el extranjero para involucrarlos de primera mano en las posibilidades que tienen las FLS.

ix. Otras acciones

- Durante el primer semestre de septiembre de 2014 a marzo de 2015, se realizó un estudio de las posibles localidades en el Estado de Morelos que tienen condiciones apropiadas para la instalación de una FLS.
- En la segunda semana de febrero de 2016, entre el 7 y el 15, el proyecto recibió la visita del Prof. Joan Bordas y del CEO de la compañía Master S.A. antes mencionada, el Ing. Antonio Merino. El Prof. Bordas impartió un coloquio y un seminario muy relevantes. Además se visitaron posibles sitios para localizar la FLS mexicana en el Estado de Morelos. Se abrió la posibilidad de que la compañía Master, vía la compañía Técnicas Reunidas México, realice un estudio de volúmenes y, por otro lado, amplía y afine las propuestas del Grupo de Trabajo de este proyecto.

3.2 Contribución técnica del proyecto

Los puntos más relevantes del presente proyecto son los siguientes:

- I. Se llevó a cabo una definición del tamaño y características esenciales del complejo de aceleradores que producirán la luz de sincrotrón: Un acelerador lineal que llevará la energía de los electrones de 0 a 150 MeV, un impulsor que toma los electrones del

acelerador lineal y les lleva a la energía de diseño de 3 GeV y finalmente un anillo de acumulación de unos 400 m de circunferencia que mantendrá una corriente de 500 mA produciendo la luz para las líneas experimentales.

En el anillo de acumulación es la parte determinante de las propiedades de la luz producida. Por lo que se estudiaron varias posibilidades, todas ellas inspiradas en diseños que ya están funcionando o se han propuesto en actualizaciones de FLS existentes. La primera etapa se realizó sobre un anillo de 300 m de circunferencia con 3 GeV de energía y 300 pm.rad de emitancia, estos parámetros fueron sugeridos al proyecto por un grupo de expertos internacionales. Robert Hettel, Riccardo Bartolini y Francis Pérez en noviembre de 2014. Los anillos de acumulación se diseñan en base a celdas unitarias que se repiten un número entero de veces en la circunferencia. Entre el conjunto de celdas unitarias estudiadas se han elegido dos:

Una con dos imanes deflectores, esta estructura se llama DBA (double bend achromat) y es típica de las FLS construidas en la década del 2000, por ejemplo ALBA, SLS en Suiza y Soleil en Francia. Tiene varias virtudes entre ellas un diseño probado con amplios espacios para los dispositivos de inserción y de inyección, es en suma un diseño que garantiza funcionamiento apropiado, en el lado menos positivo no otorga una emitancia pequeña por lo que su implementación limitaría la coherencia de la luz en las terminales experimentales cercanas. Con todo, si se usan dispositivos de inserción de amortiguamiento atemperar esta limitante.

La otra tiene nueve imanes deflectores-cuadripolares en la celda unitaria. Es un diseño avanzado que implica métodos innovadores de control e inyección de haz. La ventaja principal es que reduce considerablemente el tamaño de la celda unitaria aunque presenta un elemento de riesgo pues la apertura dinámica es muy limitada y el sistema de inyección es poco eficiente y se reduce el tiempo de vida del haz de electrones. Desde el punto de vista de emitancia y luminosidad generaría, en cambio, una gran eficiencia.

Las consultas realizadas con el Dr. Bordas y los diseños del anillo de acumulación muestran que es extremadamente conveniente incrementar la circunferencia del anillo esto tiene un impacto directo sobre el costo final del proyecto. El diseño favorecido es una energía de 3 GeV, una emitancia menor a 1nm.rad y una circunferencia de cerca de 400m.

El **anexo de aceleradores** contiene dos partes la primera es el estudio realizado por este proyecto para los aceleradores de la FLS mexicana. La segunda parte es el estudio de Técnicas Reunidas-Master (TR-M) que elabora sobre el diseño de los anillos de acumulación antes mencionados y que incluye una distribución de volúmenes, una

proyección del número de líneas experimentales y los blindajes apropiados para las distintas arquitecturas del complejo de aceleradores estudiadas.

- II. Desde el informe de medio término se entregó un estudio de suelos de carácter informativo. Esto es se realizó un estudio del Estado de Morelos con precisión de 1 Km² e introduciendo un conjunto de criterios como uso de suelo, cercanía de medios de transporte, electricidad, disponibilidad de agua, etc. El estudio se hizo en base a información pública del INEGI. El **anexo estudio de suelo** presenta la metodología y los resultados de este estudio. Este estudio fue supervisado por el Ing. Dr. Efraín Ovando Shelley, Coordinador de Geotécnica, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- III. Un estudio reciente de especial importancia para la localización de un Sincrotrón en Morelos es el estudio sobre la red de distribución eléctrica realizado por el M. en C. Héctor Domínguez y que se presenta en el anexo
- IV. Uno de los requerimientos de la demanda Fomix fue la presentación de un anteproyecto arquitectónico, éste se debió hacer sin las especificaciones de terreno y fue realizado en agosto de 2015, está basado en una circunferencia de 300 m. Los planos y perspectivas forman el **anexo arquitectónico**, el cual deberá ser actualizado a las especificaciones de los últimos diseños señalados en el punto I.
- V. Otra de las demandas del proyecto Fomix fue la de realizar un estudio de viabilidad. Éste fue ejecutado por el Dr. Víctor del Río y se presenta en el **anexo de estudio de viabilidad**. Se trata de un amplio estudio que incluye las experiencias de cinco FLS que son, por razones diversas, cercanas al proyecto de FLS mexicano: SESAME en Jordania, ALBA en España, LNLS y SIRIUS en Brasil y el Sincrotrón Australiano en el estado de Victoria, Australia.
- VI. Un tema en el que el proyecto ha trabajado de manera pionera es la creación de un conjunto de ejemplos, 100 hasta este momento, que han sido obtenidos de los 4000 casos detectados con estudios dirigidos o realizados por la industria en las FLS alrededor del mundo. Estos y folletos creados para algunas áreas empresariales se recolectan en el **anexo Usos Industriales**. Esto incide de manera directa con el objetivo de la demanda del Fondo de tener un plan de negocios ya que con esta información se podrán tener ejemplos específicos por cada tipo de empresa.

3.3 Productos de la investigación

Hay varios productos de las investigaciones hechas durante el proceso de elaboración de este proyecto.

Primero, la elaboración de un conjunto de técnicas para optimizar la emitancia del anillo de acumulación (A. Antillón y A. Flores). Asociado a los aspectos civiles del proyecto se aplicaron un conjunto de técnicas lógicas para determinar las ubicaciones geográficas en el Estado de Morelos (E. Sánchez) y se realizó un estudio de las regiones óptimas en el mismo estado en lo que toca a suministro eléctrico.

En segundo lugar se realizó un estudio de viabilidad (V. del Río) que incluyó un comparativo de cinco Fuentes de Luz Sincrotrón (FLS). En paralelo a esto se hizo un estudio de aplicaciones de uso industrial único en el mundo en lo que respecta a la amplitud del estudio, más de veinte FLS y que comprende los últimos diez años, de estos se escogieron cien ejemplos a los que se les realizó una ficha técnica (J. Reyes y M.A. Torres).

3.4 Formación de recursos humanos

Tres participantes del proyecto obtuvieron un grado en el transcurso del mismo y en temas relevantes para el mismo:

Héctor Domínguez Sotelo, Maestría en Ciencias (Físicas), UNAM, “ Marco general para el desarrollo de un Sincrotrón y la optimización elemental de su emitancia”, Asesor Dr. Armando Antillón Díaz, Mayo de 2015.

Edgar Andrés Sánchez García, Candidatura al Doctorado (Física) y Maestría en Ciencias (Físicas), UNAM, con el protocolo de investigación “Estudio de la radiación sincrotrón, interacción de luz con electrones ultrarelativistas y el papel de la polarización en interacciones luz-materia”, Asesor Dr. Matías Moreno Yntriago. Agosto 2015.

Juan Reyes Herrera, Doctorado en ciencias (Física), UNAM, “Emisión de rayos X característicos por irradiación simultánea con iones y fotones “ , Asesor: Javier Miranda Martín del Campo, Diciembre de 2015.

3.5 Colaboración interinstitucional y multidisciplinaria

Este es un proyecto intrínsecamente interinstitucional y multidisciplinario. Así en el Grupo de Trabajo (GT) se integraron a tres institutos de la UNAM: Física, Ciencias Físicas y Ciencias Nucleares; el Cinvestav-Mérida y, a nivel individual la Universidad de Guanajuato. Como el proyecto tiene un vínculo estrecho con el Estado de Morelos no se juzgó conveniente la participación institucional de universidades en otros Estados de la República. Esto no obstó para

que dos miembros del GT (MM y JIMyT) participaran activamente en la Red de Usuarios de Luz Sincrotrón en la que se incorporan universidades y centros de investigación de toda la República.

El carácter multidisciplinario del proyecto es real pero en esta etapa el foco es el diseño del complejo de aceleradores. De nuevo la estrecha asociación con la RedTULS implica una colaboración intensa entre físicos, químicos, biólogos, etc.

4. Impacto de la Investigación en los Sectores Usuarios

4.1 Productos del proyecto transferidos o transferibles a los usuarios (o al área correspondiente para el caso de proyectos de empresa)

El producto directo más evidente es la elaboración de las cien fichas de usos industriales. Otro aspecto importante que ha integrado los esfuerzos del proyecto con los usuarios es el patrocinio de la 5a Reunión de Usuarios de Radiación Sincrotrón y el apoyo humano de miembros del GT a las actividades de la RedTULS. Por otro lado, se ha impulsado la creación de la Asociación Mexicana de Usuarios de Sincrotrón A.C., en ésta convergen de manera voluntaria los interesados en las ciencias, las tecnologías y los usos de las FLS.

Para tener un mecanismo de difusión efectivo el proyecto produjo un video que ha tenido una difusión e impacto mundial. Este se anexa a este informe.

4.2 Mecanismos de transferencia utilizados

Se pondrán en línea tanto los casos de estudio arriba mencionados como los folletos dirigidos a tipos de empresa. Éstos han sido distribuidos en los eventos organizados por el proyecto y por la RedTULS.

4.3 Beneficio potencial del proyecto

El primer beneficio del proyecto ha sido dar a conocer a la comunidad científica y tecnológica del país una herramienta esencial en el desarrollo de múltiples disciplinas. Si el país tiene la visión y el compromiso de construir, operar y explotar una Fuente de Luz Sincrotrón este proyecto habrá cumplido su razón de ser; en este caso los beneficios serán enormes.

Un beneficio intangible ha sido el iniciar el trazado de un mecanismo para que el país tramite de manera racional las decisiones de una empresa de esta magnitud.

5. Aplicación de los Recursos Financieros

Este aspecto se presenta por separado.

6. Recomendaciones

6.1 Para la implantación de las acciones derivadas del proyecto

Se recomienda seguir impulsando la etapa de diseño técnico detallado y proyecto ejecutivo de arquitectura e ingeniería (DTD y PEAI). Esta etapa ya ha sido aprobada por el Congreso de la Unión pero debe ser fijado el monto del apoyo por el Ejecutivo Federal. Los integrantes del proyecto no son ajenos a la difícil situación financiera del país, pero juzgan que monto de la siguiente etapa a llevarse a cabo en dos años para DTD y PEAI es de una inversión perfectamente alcanzable.

Por otro lado la construcción de un línea experimental en un laboratorio ya establecido o mejor aún la asociación de nuestro país con uno o más sincrotrones proveerá de una base sólida para el desarrollo de habilidades y recursos humanos, además de que dará un mecanismo para que las empresas nacionales se involucren como proveedores y como usuarios.

7. Anexos

Anexo 1 Aceleradores de la futura fuente de luz sincrotrón de México

Anexo 2 Informe de un estudio de implantación de una instalación de luz sincrotrón en el Estado de Morelos

Anexo 3 Informe preliminar sobre la idoneidad de los terrenos propuestos.

Anexo 4 Anteproyecto arquitectónico

Anexo 5 Estudio de suelos para determinar regiones de alto perfil para la localización de un sincrotrón en Morelos

Anexo 6 Estudio de potencia eléctrica para el sincrotrón en Morelos

Anexo 7 Estudio de Viabilidad para la construcción de un sincrotrón en México

Anexo 8 Usos industriales

Anexo 9 Eventos

Anexo 10 Tesis-versión sólo en CD

Anexo 11 Medios-versión sólo en línea

Anexo 12 Cartas de apoyo



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

**Aceleradores de la Futura Fuente de Luz
Sincrotrón de México**

Dr. Alain Flores Tlalpa
Dr. Armando Antillón Díaz
Dr. Fernando Matías Moreno Yntriago

1. Introducción

En este reporte describimos el conjunto de aceleradores que proponemos para la fuente de luz Mexicana (MLS, por sus siglas en inglés). Usualmente, las fuentes modernas de luz sincrotrón están compuestas por 4 aceleradores: el cañón de electrones (o *e-gun*), el acelerador lineal (o *linac*, acrónimo de *linear accelerator*), el impulsor (o *booster*) y el anillo de almacenamiento. El acelerador lineal y el impulsor están conectados mediante una línea de transferencia que denominaremos LTB, mientras que la línea de transferencia que conecta el anillo de almacenamiento con el impulsor la denominaremos BTSR; el acelerador lineal se coloca inmediatamente después del cañón de electrones. En la figura 1.1 se muestra la configuración más común de los aceleradores de un sincrotrón, en la cual se muestran también las terminales o líneas experimentales; la imagen es una representación del sincrotrón francés SOLEIL [1].

Otra posible configuración, bastante interesante, es la de la fuente de luz sueca MAX IV [2] que está diseñada para que en el futuro tenga un láser de electrones libres (FEL, por sus siglas en inglés). Para esto, han prescindido del impulsor y colocado el cañón de electrones y el *linac*, que es muy largo (tiene aproximadamente 300 m de longitud), fuera del anillo de almacenamiento principal (MAX IV tiene dos anillos de almacenamiento uno de 528 m de circunferencia y 3.0 GeV de energía, y otro de 96 m de circunferencia y 1.5 GeV de energía).

Para la MLS elegimos un impulsor con una circunferencia concéntrica al anillo de almacenamiento y con una longitud menor pero muy cercana a este último. Esta decisión tiene dos justificaciones, ambas igual de importantes, la primera es la reducción de costos, ya que de esta forma el anillo de almacenamiento y el impulsor comparten el mismo túnel de blindaje, y la segunda es el sistema de inyección (*swap-out* [3]) requerido por una red magnética de ultra baja emitancia, que es una de las propuestas para el anillo de almacenamiento basada en la actualización del sincrotrón de Berkeley (U.S.) ALS II [4]. De esta manera, el cañón de electrones y el acelerador lineal estarán al interior del impulsor. Algunos sincrotrones con esta configuración son ALBA [5] de España, SLS [6] de Suiza y SIRIUS [7] de Brasil.

Sin embargo, también consideramos otra posibilidad interesante, en la cual el cañón de electrones, el acelerador lineal y el impulsor están fuera del anillo princi-

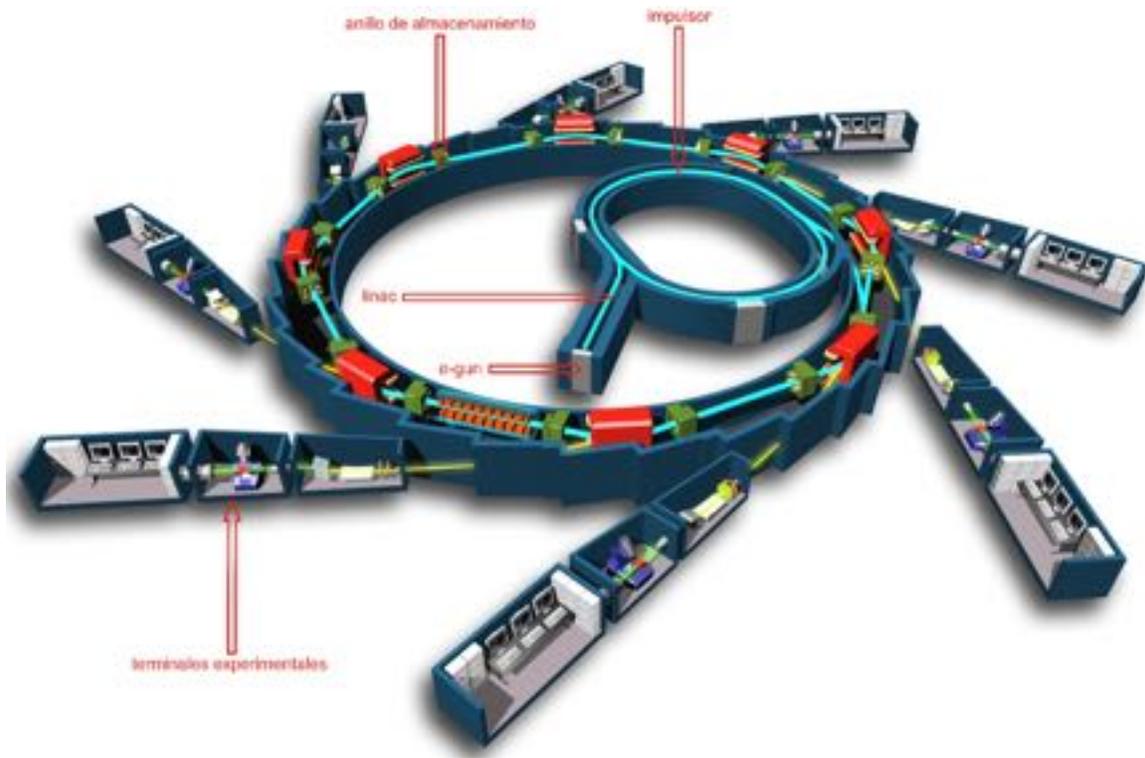


Figura 1.1. Esquema típico de un sincrotrón incluyendo las terminales experimentales [1].

pal, como en el caso de MAX IV. Esta configuración debe ser considerada si los recursos que se asignen al proyecto lo permiten.

El desempeño de una fuente de luz está determinado esencialmente por la calidad de la luz que suministra a las líneas experimentales. De acuerdo con las tendencias actuales es deseable una alta brillantez B , que va como

$$B \approx \frac{I}{\varepsilon^2},$$

donde I es la corriente de electrones y ε la emitancia del haz de electrones; también son deseables la estabilidad, y la coherencia espacial y temporal del haz de fotones. En los últimos años se encontró que la forma más eficaz de darle una mayor estabilidad al haz de fotones es manteniendo constante la corriente de la fuente en el anillo de almacenamiento, lo cual se consigue repitiendo periódicamente la inyección mientras se da servicio a los usuarios. A este sistema de inyección se le conoce como *top-up* [8]. La brillantez de la luz se incrementa reduciendo, tanto como sea posible, la emitancia del haz de electrones y/o aumentando su corriente. Cuando la emitancia del haz de electrones llega a ser menor que la emitancia de la luz ($\lambda/4\pi$) no es posible incrementar más la luminosidad [9,10,11], a este límite se le

conoce como el *límite de difracción*. La enorme ventaja de que una fuente de luz alcance el límite de difracción es la obtención de un haz de fotones con coherencia total, es decir, tanto espacial como temporal. Los sincrotrones que actualmente se están construyendo y planeando, así como la mayoría de las actualizaciones programadas de las fuentes existentes apuntan al límite de difracción para rayos X, lo cual se logra, para longitudes de onda entre 10 pm y 10 nm, con emitancias del haz de electrones en el rango de 0.8 pm·rad y 800 pm·rad. A estas se les conoce como *fuentes de luz limitadas por difracción*. La corriente I está limitada superiormente por el tamaño de la circunferencia del anillo de almacenamiento, ya que esta determina el número máximo de paquetes de electrones que se pueden almacenar, típicamente la corriente máxima es de 500 mA. Mientras que la corriente mínima es de unos cuantos mA (~ 5) y está determinada por el sistema de radiofrecuencia (RF), que fija el tamaño de un paquete de electrones. El sistema de RF y los sistemas de inyección deben ser capaces de proporcionar desde un solo paquete de electrones hasta el número de paquetes necesario para alcanzar la corriente máxima.

Como sabemos los láseres de electrones libres son las fuentes de luz más avanzadas de la actualidad, sin embargo, estas tienen dos grandes desventajas: ser sumamente costosas y dar servicio a un reducido número de líneas experimentales, en comparación con los sincrotrones de tercera generación. Así pues, si lo que queremos es brindar luz de una excelente calidad a un gran número de líneas experimentales y a un costo razonable, entonces un sincrotrón limitado por difracción para rayos X es una excelente opción para nuestro proyecto. Otra ventaja de las fuentes de luz limitadas por difracción es que su funcionalidad no puede ser reemplazada por los FELs, sino que en realidad ambas fuentes son complementarias, como se señala en [12]. En este sentido, un grupo de expertos internacionales (Robert Hettel de SLAC, Riccardo Bartolini de DIAMOND y la Universidad de Oxford, y Francis Pérez de ALBA), reunidos en el Tercer Taller Mexicano sobre Física de Aceleradores realizado en Huatulco en noviembre del 2014, sugirieron para el anillo de almacenamiento de la MLS una energía de 3 GeV, una circunferencia de 300 m y una emitancia horizontal de 300 pm·rad.

Para conseguir los parámetros propuestos por el grupo de expertos internacionales decidimos seguir el diseño de ALS II [4] y usar una celda 9BA (acrónimo del inglés *9-bend-achromat*). Vale la pena mencionar que una de las primeras fuentes de luz limitada por difracción, para rayos X, MAX IV entrará en operación en menos de un año, su anillo principal tendrá una emitancia horizontal de

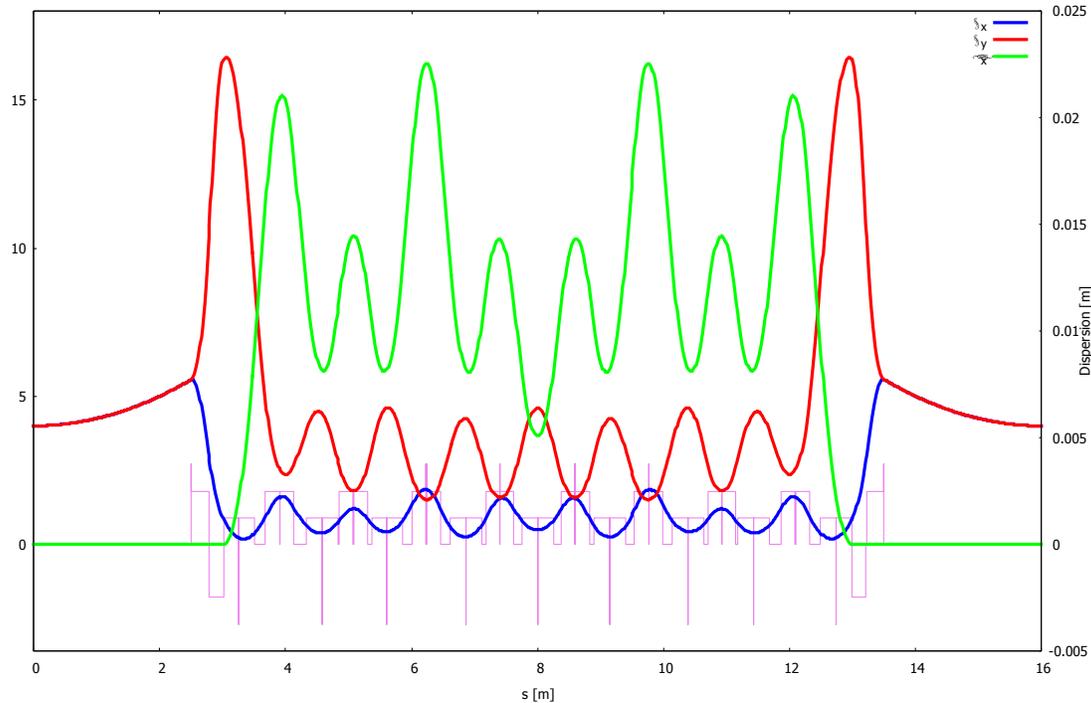


Figura 1.2. Funciones ópticas de la celda 9BA con una emitancia horizontal de $84 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ y 3 GeV de energía, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente, y en violeta se indica el arreglo de imanes. Estos resultados se obtuvieron usando el programa OPA [13].

tan sólo $330 \text{ pm}\cdot\text{rad}$. Otras fuentes de luz que actualmente están en planeación o construcción conseguirán emitancias menores a la de MAX IV, por ejemplo, SIRIUS tendrá una emitancia de $280 \text{ pm}\cdot\text{rad}$. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el tiempo de planeación, diseño, construcción y puesta en marcha de un sincrotrón es típicamente de unos 10 años, si queremos que la MLS sea competitiva a nivel internacional cuando entre en operación debemos ser más ambiciosos y buscar un diseño con una emitancia mucho menor a la sugerida por el grupo de expertos.

Trabajando en esta dirección el diseño más interesante que obtuvimos tiene 3 GeV de energía, 320 m de circunferencia y $84 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ de emitancia horizontal, sin embargo, tiene una apertura dinámica muy limitada que complica la inyección aún con el sistema de intercambio (*swap-out*) [3]. Las funciones betatrón y la dispersión de una de las veinte celdas 9BA que forman el anillo de almacenamiento se muestran en la figura 1.2, en violeta se indica el arreglo de imanes. La red magnética se optimizó para que las cromaticidades naturales se mantuvieran bajas, -71.9 para la horizontal y -90.5 para la vertical, no obstante, la falta de espacios para colocar

sextupolos dedicados es la principal limitante. Por supuesto, aumentar tales espacios fue el siguiente paso lógico.

Es bien conocido que los anillos de almacenamiento de ultra-baja emitancia, como el que nos ocupa ahora, son altamente no-lineales, debido a que los sextupolos que se requieren para corregir los errores cromáticos son extremadamente intensos, y por lo tanto sus efectos no-lineales indeseables (como la destrucción de la apertura dinámica) son muy difíciles de corregir [2,7,14]. Por esta razón decidimos relajar la condición sobre la circunferencia y permitimos que ésta creciera hasta aproximadamente 400 m. Esto nos permitió desarrollar detalladamente dos diseños competitivos para el anillo de almacenamiento, uno usando una celda 9BA con una emitancia de 103 pm·rad y otro usando una celda DBA (acrónimo del inglés *double-bend-achromat*) con una emitancia de 1100 pm·rad. Vale la pena mencionar que la emitancia del último diseño se podría reducir aproximadamente un 71% (~319 pm·rad) si se colocan 8 ‘zigzageadores’ de amortiguamiento (*damping wigglers*) similares a los de NSLS II [14] en el mismo número de secciones rectas. La ventaja de un diseño basado en una celda DBA, como lo señaló el experto internacional Joan Bordas, asesor internacional del proyecto, es la reducción de riesgos, ya que este tipo de celdas tienen una tecnología que ha sido probada y perfeccionada en las últimas dos décadas.

2. Anillo de almacenamiento

El anillo de almacenamiento es la parte central de un sincrotrón, ya que determina las características principales del haz de electrones y por lo tanto las características de la luz que se produce. La estructura básica de un anillo de almacenamiento es la estructura magnética que mantiene a los electrones circulando alrededor de una órbita de diseño y se compone esencialmente de imanes de desvío (típicamente dipolos), imanes de focalización (cuadrupolos) e imanes para corregir los errores cromáticos (sextupolos cromáticos) y para optimizar la apertura dinámica (sextupolos geométricos). A la red magnética formada por estos imanes básicos se le suele llamar *red magnética desnuda*, y es la que describimos en este capítulo. Sin embargo, un anillo de almacenamiento es un aparato mucho más complejo, además de la red magnética desnuda y de los dispositivos de inserción (*IDs*, por sus siglas en inglés), que generan la luz más brillante, posee otros sistemas tales como el de vacío, radiofrecuencia, enfriamiento, diagnóstico y control. Entonces, la estructura magnética completa del anillo de almacenamiento se compone por la red magnética desnuda, los imanes correctores del sistema de control y los dispositivos de inserción, pero la primera es la estructura más básica a partir de la cual se construye todo el acelerador.

La finalidad de una fuente de luz es dar servicio a los usuarios, así que sus características deben de ser determinadas por los mismos cuando tienen la madurez suficiente para hacerlo. La tendencia actual en la comunidad internacional al respecto es bastante clara: *tener un anillo de almacenamiento con la emitancia más baja que sea posible, que permita también tener un flujo alto en algunas líneas*. De acuerdo con la referencia [15], la emitancia de una red magnética desnuda está dada por

$$\varepsilon = C(latt) \frac{E^2}{N_d^3},$$

donde E es la energía del haz de electrones, N_d es el número de imanes de desvío y $C(latt)$ es una constante que depende de la red magnética. La forma más sencilla de reducir la emitancia de un anillo de almacenamiento es aumentando el número de imanes de desvío en su red magnética, sin embargo, esto implica una circunferencia más grande y por lo tanto un mayor costo, lo cual representa siempre una limitante que hay que tener en cuenta a la hora del diseño. En general se busca una

circunferencia compacta para reducir costos, con una emitancia tan baja como sea posible pero manteniendo un buen desempeño.

Otra forma de reducir la emitancia es buscar que la constante de estructura de la red magnética C tenga un valor muy cercano a su mínimo teórico. Para conseguir esto se requiere un complicado proceso de optimización lineal y no lineal que demanda muchos recursos humanos y computacionales con los que no contamos por el momento.

Otra opción es aumentar el número de imanes de desvío N_d haciendo imanes más cortos y minimizando los espacios entre los elementos magnéticos, de esta forma la celda magnética principal es muy compacta y se puede construir con más de tres imanes de desvío. Este tipo de celdas, conocidas con el acrónimo MBA, por *Multi-Bend-Achromat*, fueron propuestas por D. Einfeld *et al.* entre los años de 1992 y 1993 [16] y llevadas a cabo por primera vez en el sincrotrón MAX IV (su anillo de almacenamiento principal usa una celda 7BA) que pronto entrará en operación después de resolver dificultades técnicas derivadas de la reducción de dimensiones.

Tiempo después de que probaran la factibilidad de las celdas MBA en MAX IV prácticamente todos los nuevos sincrotrones se empezaron a diseñar con este tipo de celdas, destacando entre ellas la actualización de ALS con celdas 9BA [4], que adicionalmente utiliza cuadrupolos fuera de centro (figura 2.1) para desviar los electrones, en lugar de dipolos convencionales. La ventaja de este esquema es que las celdas principales se vuelven muy compactas y se pueden incluir gradientes altos en un mayor número de imanes desviadores, lo que no es posible con dipolos tradicionales. De esta manera, con apenas una circunferencia de 200 m el anillo de almacenamiento de ALS II tiene 12 celdas 9BA y una emitancia horizontal de tan sólo 50 pm·rad, con una energía del haz de electrones de 2 GeV. Para tener una idea del avance que esto puede representar en el futuro, *si se prueba la eficacia del diseño de ALS II*, basta mencionar que el anillo de almacenamiento de MAX IV (SIRIUS) tiene 20 celdas 7BA (5BA), una circunferencia de 528 m (518 m) y una emitancia horizontal de 330 pm·rad (280 pm·rad), a una energía de 3 GeV. Es decir, aun cuando la circunferencia de MAX IV (SIRIUS) es 2.64 (2.59) veces más grande que la de ALS II, la emitancia de MAX IV (SIRIUS) es 6.6 (5.6) veces más grande que la de ALS II. Esto indica que en ALS II se ha hecho un gran esfuerzo en el diseño de su celda para reducir de la emitancia, con los posibles riesgos involucrados. Si bien una celda 9BA como la de ALS II tiene ventajas importantes, como una brillantez alta y por tanto un mejor desempeño de la fuente de luz, debe-

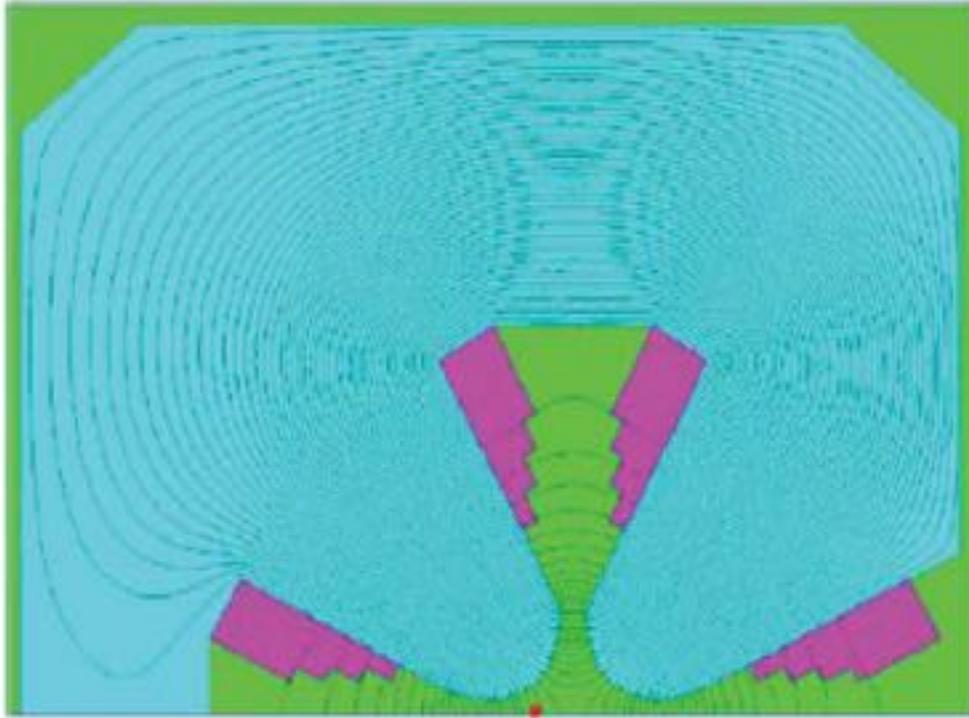


Figura 2.1. Una mitad de un imán de desvío de ALS II (cuadrupolo), el eje del haz de electrones se indica con el punto rojo.

mos tener presente que también conlleva un riesgo elevado, por su tecnología novísima y las pequeñas tolerancias de las ingenierías involucradas.

Una alternativa que tiene un riesgo reducido, como ya lo mencionamos, es un anillo de almacenamiento basado en celdas DBA que gozan de una gran fiabilidad. Un punto intermedio en el nivel de riesgo lo representa un diseño basado en una celda magnética 7BA, como la de MAX IV, pues en unos años se probará su fiabilidad. En la fase en que se encuentra el proyecto mexicano no se puede descartar ninguna de estas posibilidades, por lo que desarrollamos varios diseños para la red magnética del anillo de almacenamiento con diferentes niveles de riesgo: bajo (DBA), intermedio (7BA) y alto (9BA). Sin embargo, decidimos elegir dos diseños, uno de riesgo bajo, denominado MLS-DBA, y otro de riesgo alto, denominado MLS-9BA, para desarrollarlos más ampliamente. Otras opciones como el uso de dipolos con el campo magnético invertido (*anti-bendings*) en la implementación del SLS [17] o esquemas híbridos usados en las implementaciones de ESRF y APS [18] deberían ser consideradas como modelos de estudio en el futuro.

| Parámetros | Valores | Unidades |
|----------------------|---------|----------|
| Energía | 3.0 | GeV |
| Circunferencia | ~400 | m |
| Emitancia horizontal | ~300 | pm·rad |

Tabla 2.1. Valores deseables de los parámetros principales más importantes del anillo de almacenamiento de la MLS.

La tecnología de las fuentes de luz de energía intermedia (entre 2.5 y 3.5 GeV) es la que más se ha desarrollado en los últimos años [14] debido a la enorme popularidad de este tipo de aceleradores (la gran mayoría de los sincrotrones actuales son de energía intermedia); esto a su vez ha provocado que dicha tecnología sea más accesible y confiable. Por esta razón y por la sugerencia de los expertos, la energía de la MLS se fijó en 3 GeV. Un resumen de los valores deseables de los parámetros principales más importantes del anillo de almacenamiento de la MLS se da en la tabla 2.1.

2.1. Red magnética lineal

A continuación describiremos dos modelos para el anillo de almacenamiento de la MLS en la aproximación lineal de la dinámica, es decir, a nivel de la llamada *óptica lineal*, donde sólo los imanes de desvío y focalización son relevantes, los esquemas de sextupolos se consideran en la siguiente sección. Como hemos mencionado, estos modelos son de riesgo alto y bajo, con el primero se obtiene una emitancia menor y en consecuencia una brillantez mayor, mientras que con el segundo la emitancia es más modesta aunque la brillantez es competitiva.

2.1.1. Modelo MLS-DBA

El modelo MLS-DBA para el anillo de almacenamiento se construye usando 24 celdas DBA, incluyendo 4 secciones rectas largas de 8 m (LSS) y 20 secciones rectas medianas de 4.5 m (MSS). Se usan dos tipos de celdas DBA, conocidas como *celdas unidad* (UC) y *celdas de emparejamiento* (MC). Un *super-periodo* se construye de la siguiente manera

$$(LSS/2, MC, MSS, UC, MSS, UC, MSS, UC, MSS, UC, MSS, UC, MSS, UC, MSS, MC, LSS/2),$$

donde el denominador 2 en los elementos de los extremos indica que se trata de la mitad de las LSS. El anillo de almacenamiento se compone de cuatro super-periodos dando como resultado una circunferencia de 412 m y una emitancia horizontal de 1100 pm·rad. Evidentemente, la circunferencia tiene el valor apropiado mientras que la emitancia es 3.7 veces más grande que el valor deseado. Sin embargo, este modelo tiene la ventaja de ser perfectamente factible ya que la tecnología de las celdas DBA, para una fuente de luz de tercera generación, se ha perfeccionado durante los últimos 23 años. Además, debemos considerar que si usamos zigzageadores de amortiguamiento, como se hace actualmente en NSLS II [14], es posible reducir la emitancia hasta el valor deseado. En efecto, con 3 IDs de este tipo la emitancia horizontal se podría reducir hasta en un 57%, es decir, hasta los 473 pm·rad, mientras que con 8 la reducción sería de hasta un 71% y se alcanzaría el valor deseado de la emitancia horizontal, 319 pm·rad.

Los valores de las cromaticidades naturales horizontal y vertical son -62 y -39 respectivamente, que resultan ser de un tamaño moderado por lo que su corrección no debe representar gran dificultad. Un anillo de almacenamiento con características similares a este modelo es el del SSRF [19] (Shanghai, China), el cual tiene 432 m de circunferencia, 3.5 GeV de energía, 3.9 nm·rad de emitancia (en el modo de emitancia baja), -56/-19 de cromaticidad natural horizontal/vertical y usa 20 celdas DBA. Si bien las cromaticidades naturales del modelo que consideramos son más grandes que las del SSRF, la emitancia de nuestro diseño es mucho más pequeña. Una descripción más detallada del anillo de almacenamiento MLS-DBA se da en la tabla 2.2, donde mostramos sus parámetros principales, la geometría del anillo se muestra en la figura 2.2. Es importante mencionar, que de las 24 secciones rectas libres (4 largas y 20 medianas) una se ocupará para el sistema de inyección y otra para las cavidades de RF, que sirven para proporcionar a los electrones la energía que pierden por la emisión de radiación. Por lo tanto, el anillo de almacenamiento MLS-DBA tendría espacio para 22 dispositivos de inserción, incluyendo zigzageadores de amortiguamiento para reducir la emitancia, que servirán para dar luz al mismo número de terminales experimentales. Adicionalmente, se podría usar la luz que se emite en los imanes de desvío para otras terminales experimentales, de manera que si se usa uno de los imanes de las celdas unidad entonces tendríamos 16 terminales adicionales. Esto significa que la MLS-DBA podría dar luz a un total de 38 terminales experimentales de manera simultánea.

Una celda DBA de emparejamiento se compone de 2 dipolos con campo gradiente (DIPm), 8 cuadrupolos (QF1,... QF6, QD1, QD2) y 7 sextupolos (SF1, SF2, SF3, SD1,... SD4), y su arreglo es el siguiente

| | | |
|--|------|-----|
| Frecuencia sincrotrón | 2.62 | kHZ |
| Longitud natural de los paquetes | 2.6 | mm |
| | 8.8 | ms |
| Tolerancia de la energía del sistema de RF | 4.6 | % |

Tabla 2.2. *Parámetros principales del anillo de almacenamiento MLS-DBA.*

| Familia | Longitud [m] | Ángulo de desvío [°] | Campo gradiente ($ B' $) [T/m] |
|---------|--------------|----------------------|----------------------------------|
| DIPu | 1.384 | 7.5 | 5.93 |
| DIPm | 1.384 | 7.5 | 5.73 |

Tabla 2.3. *Parámetros principales de los imanes de desvío (dipolos con campo gradiente) del anillo de almacenamiento MLS-DBA.*

| Familia | Longitud [m] | Intensidad del campo ($ B' $) [T/m] |
|---------|--------------|---------------------------------------|
| QF1 | 0.29 | 14.94 |
| QF2 | 0.29 | 19.38 |
| QF3 | 0.29 | 15.50 |
| QF4 | 0.23 | 14.93 |
| QF5 | 0.31 | 18.41 |
| QF6 | 0.53 | 20.69 |
| QF7 | 0.53 | 20.54 |
| QF8 | 0.31 | 20.63 |
| QD1 | 0.23 | 18.23 |
| QD2 | 0.29 | 19.16 |
| QD3 | 0.29 | 20.59 |

Tabla 2.4. *Parámetros principales de los cuadrupolos del anillo de almacenamiento MLS-DBA.*

(*QD1, D11, QF1, D12, SF1, D13, QF2, D14, SD1, D15, DIPm, D21, SD2, D22, QF3, D23, QF4, D24, SF2, D25, QF5, D26, SD3, D28, DIPm, D31, SD4, D32, QF6, D33, SF3, D34, QD2*)

si se ubica a la izquierda del super-periodo (viéndose desde el centro del anillo de almacenamiento, figura 2.2), mientras que si se ubica a la derecha el orden de los elementos está invertido. Los elementos D_{ij} representan espacios libres de diferentes longitudes entre los imanes. En el caso de una celda DBA unidad, esta se compone de 2 dipolos con campo gradiente (DIPu), 3 familias de cuadrupolos (QF7, QF8, QD3) y 4 familias de sextupolos (SF3, SF4, SD4, SD5), y se forma de la siguiente manera:

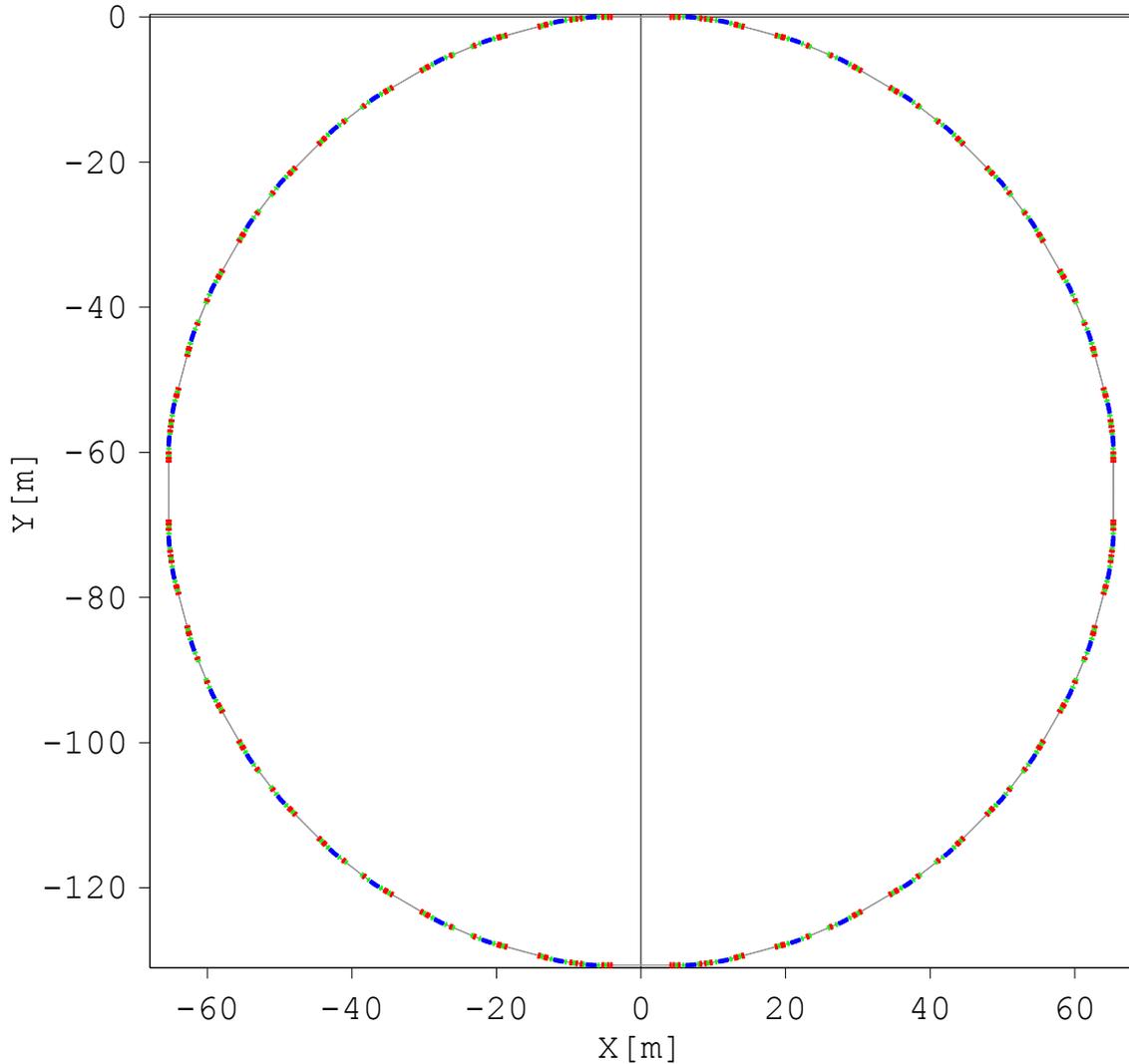


Figura 2.2. Anillo de almacenamiento MLS-DBA (obtenido con OPA), este se compone por 8 celdas DBA de emparejamiento y 16 celdas DBA unidad, 4 secciones rectas largas, 20 medianas y 16 cortas. Las celdas DBA se agrupan en 4 super-periodos, cada uno formado por 2 celdas de emparejamiento y 4 celdas unidad.

(QD3, D34, SF3, D33, QF7, D32, SD4, D31, DIPu, D41, SD5, D42, QF8, D43, SF4, SSS, SF4, D43, QF8, D42, SD5, D41, DIPu, D31, SD4, D32, QF7, D33, SF3, D34, QD3).

Es importante señalar que en la parte central de esta celda hay una sección recta corta de 2.6 m (SSS). Las dos familias de imanes de desvío tienen la misma longitud, 1.38 m, mientras que los cuadrupolos son de 0.23 m, 0.29 m, 0.31m y 0.53 m, y los sextupolos son de 0.15 m y 0.22 m. El ángulo de desvío de un super-periodo es 90° , y 15° para una celda DBA y 7.5° para un dipolo. En las tablas 2.3 y

2.4 se dan las características más relevantes de los componentes lineales (imanes de desvío y cuadrupolos) de la red magnética del anillo de almacenamiento MLS-DBA. Vale la pena mencionar que las intensidades de los imanes se pueden conseguir con materiales estándares.

Las funciones ópticas de un super-periodo del anillo de almacenamiento MLS-DBA se muestran en la figura 2.3, la dispersión horizontal está dada por la curva verde, mientras que las funciones betatrón horizontal y vertical por las curvas azul y roja, respectivamente. En violeta se indica el arreglo de imanes, ver la siguiente sección para detalles de los componentes no lineales.

El punto de trabajo o punto de operación de este anillo de almacenamiento, definido por la óptica, está dado por los tonos betatrón ($Q_x=27.80$, $Q_y=15.14$) y se muestra en la figura 2.4 donde además se muestran las líneas de resonancia hasta de sexto orden.

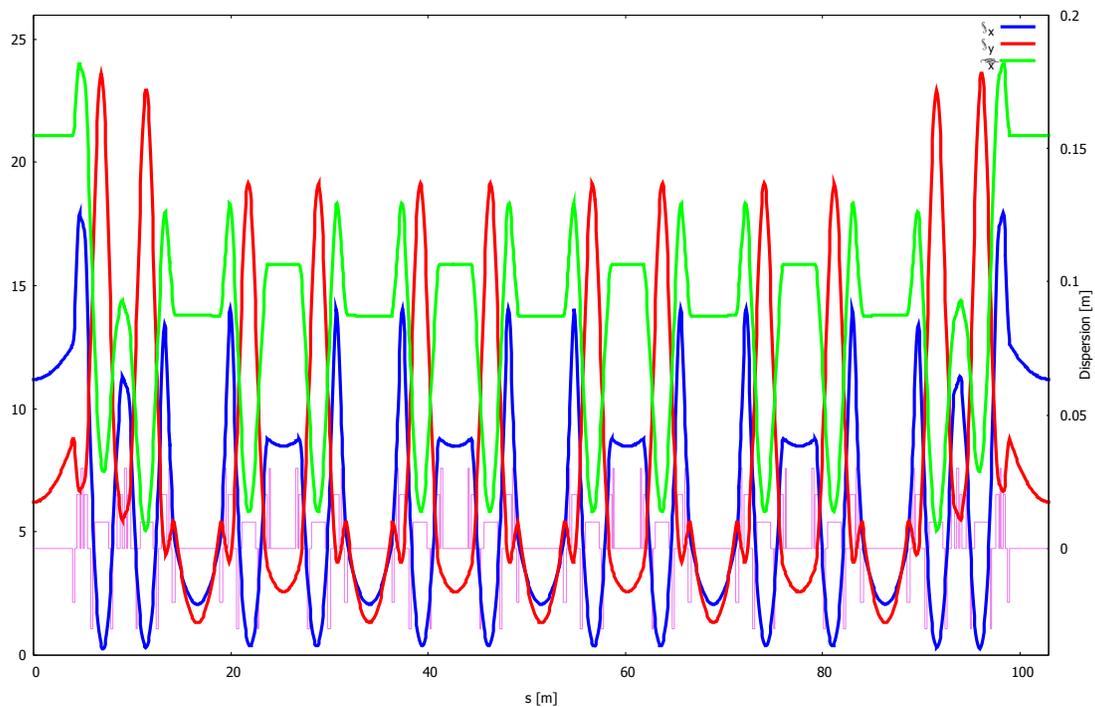


Figura 2.3. Funciones ópticas de un super-periodo del anillo de almacenamiento MLS-DBA, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente, y en violeta se indica el arreglo de imanes de las celdas DBA. Estos resultados se obtuvieron usando el programa OPA.

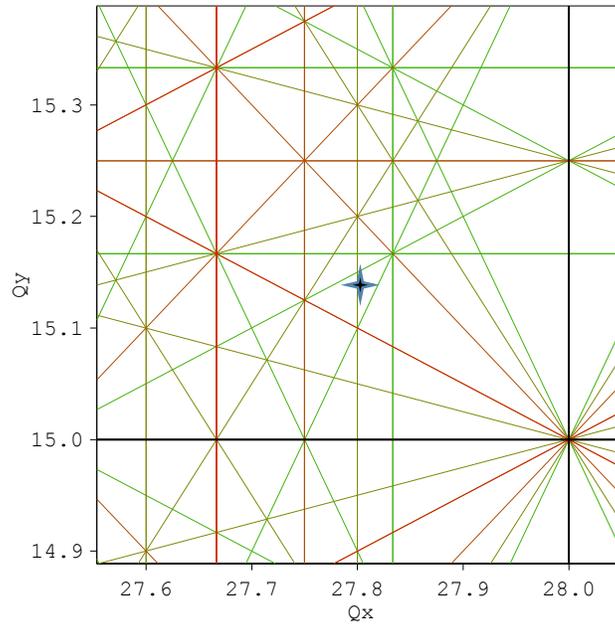


Figura 2.4. Punto de operación del anillo de almacenamiento MLS-DBA ($Q_x=27.80$, $Q_y=15.14$), se muestran resonancias de hasta sexto orden. La gráfica se obtuvo con el programa OPA.

2.1.2. Modelo MLS-9BA

En este caso, construimos el anillo de almacenamiento usando 23 celdas 9BA de 12 m de longitud y 23 secciones rectas de 5 m (SS), colocando una después de la otra de manera alternada. El resultado es un anillo de almacenamiento de 391 m con una emitancia horizontal de 103 pm·rad. Este resultado supera el valor sugerido por el grupo de expertos internacionales (tabla 2.1), de hecho es 3 veces menor. Además, los valores de las cromaticidades naturales no son excesivamente grandes, la cromaticidad natural horizontal es de -77.9 y la vertical de -81.9; como punto de referencia, los valores del anillo de almacenamiento de SIRIUS [7] en su modo de operación AC20 son -108.0 y -72.8 respectivamente. Recordemos además que SIRIUS tiene una circunferencia de 518.25 m, una emitancia horizontal de 280 pm·rad y su energía es de 3 GeV. Entonces, a pesar de que en nuestro diseño la circunferencia y emitancia son menores, conseguimos mantener las cromaticidades naturales alrededor de los valores de SIRIUS. Lo anterior fue posible gracias a un código de optimización de redes magnéticas creado por miembros del grupo junto con un estudiante de maestría como parte de su tesis [20]. Una descripción más detallada de nuestro anillo de almacenamiento se da en la tabla 2.5, donde

mostramos sus parámetros principales, la geometría del anillo se muestra en la figura 2.5. Cabe mencionar, que de las 23 secciones rectas libres una se ocupará para el sistema de inyección y otra para cavidades de RF. Por lo tanto, el anillo de almacenamiento MLS-9BA tiene espacio para 21 dispositivos de inserción, que servirán para dar luz al mismo número de terminales experimentales. Adicionalmente, se podría usar la luz que se emite en los imanes de desvío para otras terminales experimentales, de manera que si se usan los imanes del centro de cada celda 9BA tendríamos 23 terminales más. Esto significa que la MLS-9BA podría eventualmente dar luz a un total de 44 terminales experimentales de manera simultánea.

Nuestra celda 9BA se compone de 9 imanes de desvío, como los de ALS II, 20 imanes de focalización y 10 sextupolos. Recordemos que los imanes de desvío son cuadrupolos descentrados, ver la figura 2.1, así que además del campo dipolar también generan un campo cuadrupolar que evidentemente también aprovechamos.

Por cuestiones de simetría los imanes de desvío se dividieron en 5 familias ($BEND1, \dots BEND5$), los imanes de focalización en 10 familias ($Q1, \dots Q10$), los sextupolos dedicados en 5 familias ($S1, \dots S5$) y los campos sextupolares integrados en otros imanes en 3 familias ($S6, S7, S8$), y se dispusieron de la siguiente manera

$(Q1, D1, Q2, D2, S1, D3, BEND1, D4, S2, D5, S3, D6, Q3, D7, S4, D8, Q4, D9, S5, D10, BEND2, D11, Q5, D12, Q6, D13, BEND3, D14, Q7, D15, S6, D16, Q8, D17, BEND4, D18, S7, D19, Q9, D20, S8, D21, Q10, D22, BEND5, D22, Q10, D21, S8, D20, Q9, D19, S7, D18, BEND4, D17, Q8, D16, S6, D15, Q7, D14, BEND3, D13, Q6, D12, Q5, D11, BEND2, D10, S5, D9, Q4, D8, S4, D7, Q3, D6, S3, D5, S2, D4, BEND1, D3, S1, D2, Q2, D1, Q1)$

para formar la celda 9BA. Por supuesto, cada uno de los imanes está separado por espacios libres (Di) de diferentes longitudes. Todos los imanes de desvío tienen la misma longitud, 0.47 m, la longitud de los imanes de focalización varía entre 0.16 m y 0.31 m, mientras que los sextupolos dedicados son de dos longitudes diferentes, 0.1 m y 0.2 m.

El ángulo de desvío de una celda 9BA es de 15.65° y de 1.74° para cada uno de los imanes de desvío. En las tablas 2.6 y 2.7 se dan las características más relevantes de los componentes lineales (imanes de desvío y focalización) de nuestra celda 9BA.

Las funciones ópticas de una celda 9BA del anillo de almacenamiento MLS-9BA se muestran en la figura 2.6, la dispersión horizontal está dada por la curva

verde, mientras que las funciones betatrón horizontal y vertical por las curvas azul y roja, respectivamente. En violeta se indican los imanes de la celda 9BA, ver la siguiente sección para detalles de los elementos no lineales. El punto de operación del anillo de almacenamiento MLS-9BA, que define esta óptica, está dado por los tonos betatrón ($Q_x=61.78$, $Q_y=24.17$) y se muestra en la figura 2.7.

| Parámetros | Valores | Unidades |
|---|-----------------------|------------------------|
| Energía | 3.0 | GeV |
| Gama | 5870.85 | |
| Corriente máxima | 500 | mA |
| Circunferencia | 391 | m |
| Estructura de la red magnética | 9BA, sin dipolos | |
| Número de secciones rectas libres | 23 | |
| Longitud de las secciones rectas libres | 5 | m |
| Frecuencia de revolución | 0.767 | MHz |
| Periodo de revolución | 1.304 | μ s |
| Tonos betatrón, horizontal | 61.78 | |
| Vertical | 24.17 | |
| Factor de compactación de ímpetu | 1.11×10^{-4} | |
| Cromaticidad natural, horizontal | -77.9 | |
| Vertical | -81.9 | |
| Emitancia sin IDs, horizontal | 103 | pm·rad |
| vertical (sin acoplamiento) | 0.03 | pm·rad |
| Dispersión natural de energía | 0.092 | % |
| Número de partición de amortiguamiento horizontal | 1.999 | |
| Tiempos de amortiguamiento, horizontal | 8.46 | ms |
| Vertical | 16.91 | ms |
| Longitudinal | 16.89 | ms |
| Campo magnético en los imanes de desvío | 0.646 | T |
| Número de imanes de desvío | 207 | |
| Ángulo de desviación por imán | 1.74 | deg |
| Radio de curvatura de un imán | 15.48 | m |
| Energía crítica de un imán de desvío | 3.87 | keV |
| Energía perdida por vuelta por los imanes de desvío | 462.7 | keV |
| Potencia radiada por los imanes de desvío | 231.35 | kW |
| Frecuencia del sistema de RF | 496.8 | MHz |
| Número armónico | 648 | |
| Tamaño del haz con acoplamiento del 1%, sin IDs en las secciones rectas | 18×0.4 | μ m ² |
| en el centro de los imanes de desvío | 11.0×4.2 | μ m ² |
| Divergencia del haz con acoplamiento del 1%, sin IDs en las secciones rectas | 4.1×0.8 | μ rad ² |
| en el centro de los imanes de desvío | 26.5×0.7 | μ rad ² |

| | | |
|--|--------|-----|
| Voltaje total del sistema de RF | 2.7 | MV |
| Sobretensión ($q=eV/U_0$) | 3.23 | |
| Fase sincrónica | 162 | deg |
| Tono sincrotrón | 0.0045 | |
| Frecuencia sincrotrón | 2.62 | kHZ |
| Longitud natural de los paquetes | 2.6 | mm |
| | 8.8 | ps |
| Tolerancia de la energía del sistema de RF | 4.6 | % |

Tabla 2.5. *Parámetros principales del anillo de almacenamiento MLS-9BA.*

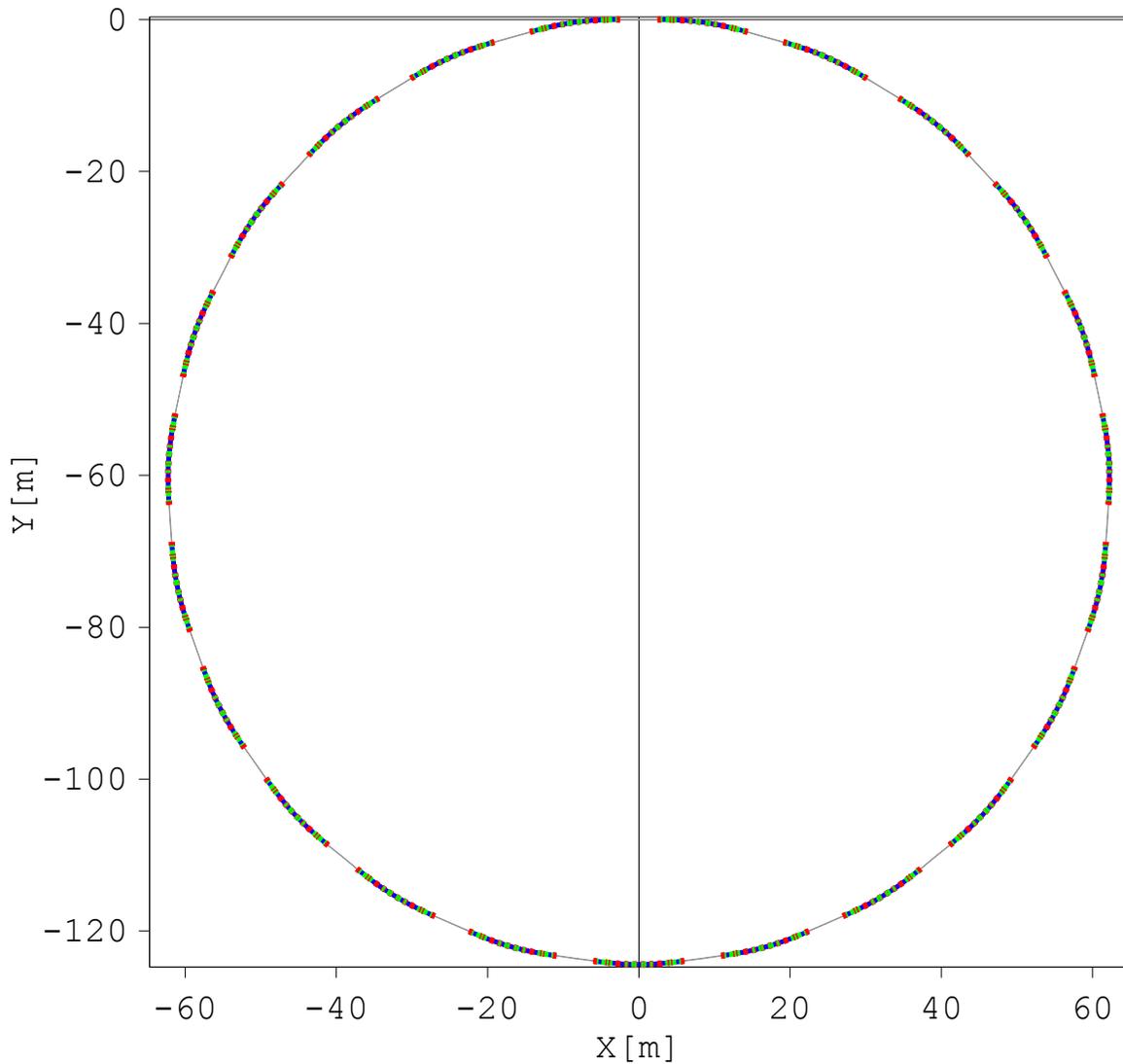


Figura 2.5. *Anillo de almacenamiento MLS-9BA (obtenido con OPA), este se compone de 23 celdas 9BA y 23 secciones rectas libres.*

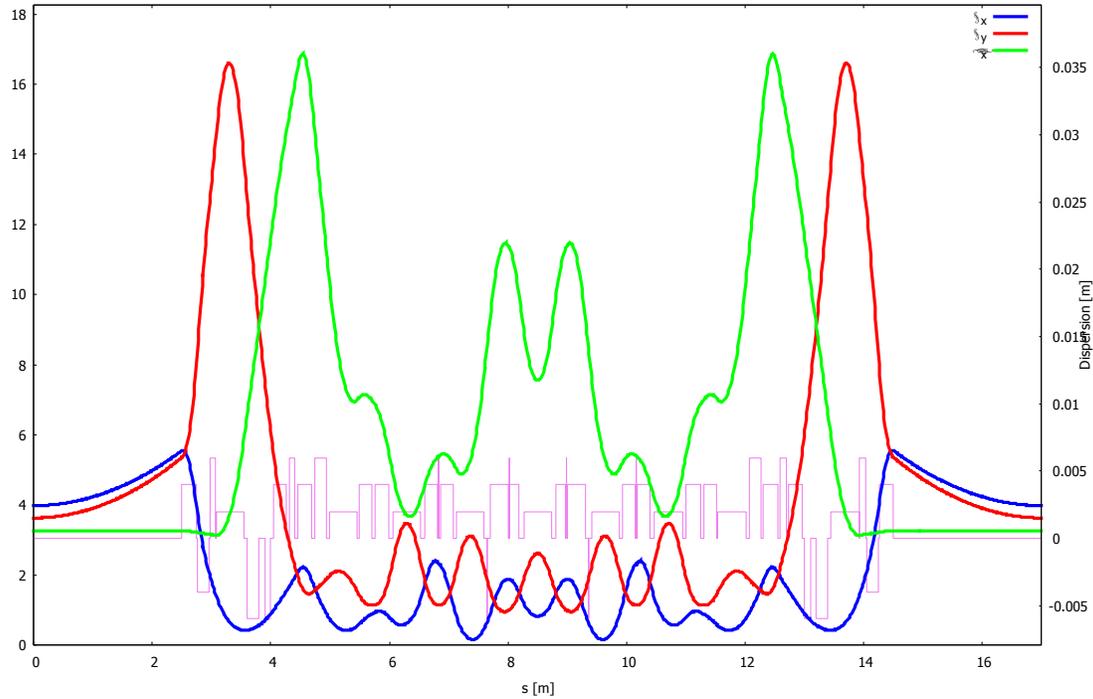


Figura 2.6. Funciones ópticas de un super-periodo del anillo de almacenamiento MLS-9BA, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente, y en violeta se indica el arreglo de imanes. Estos resultados se obtuvieron usando el programa OPA.

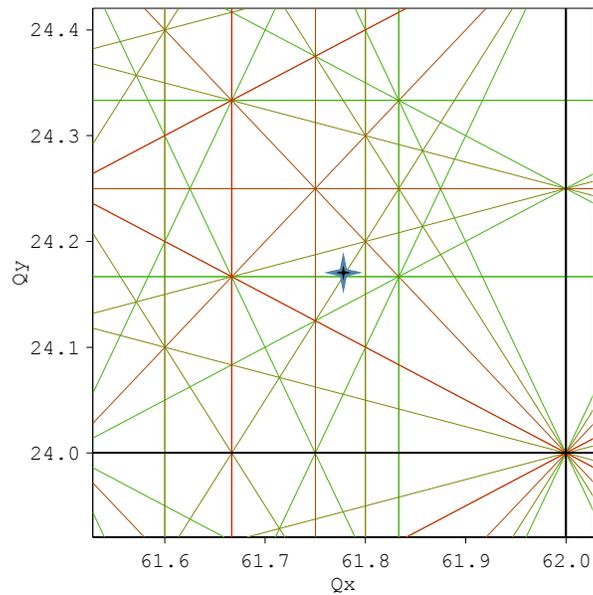


Figura 2.7. Punto de operación del anillo de almacenamiento MLS-9BA ($Q_x=61.78$, $Q_y=24.17$), se muestran resonancias de hasta sexto orden. La gráfica se obtuvo con el programa OPA.

| Familia | Longitud [m] | Ángulo de desvío [°] | Campo gradiente ($ B' $) [T/m] |
|---------|--------------|----------------------|----------------------------------|
| BEND1 | 0.47 | 1.74 | 27.58 |
| BEND2 | 0.47 | 1.74 | 32.98 |
| BEND3 | 0.47 | 1.74 | 64.86 |
| BEND4 | 0.47 | 1.74 | 62.88 |
| BEND5 | 0.47 | 1.74 | 58.73 |

Tabla 2.6. *Parámetros principales de los imanes de desvío (cuadrupolos descentrados) de la celda 9BA.*

| Familia | Longitud [m] | Intensidad del campo ($ B' $) [T/m] |
|---------|--------------|---------------------------------------|
| Q1 | 0.244 | 61.73 |
| Q2 | 0.196 | 27.38 |
| Q3 | 0.217 | 13.49 |
| Q4 | 0.240 | 83.44 |
| Q5 | 0.206 | 52.77 |
| Q6 | 0.246 | 80.62 |
| Q7 | 0.215 | 99.95 |
| Q8 | 0.221 | 88.90 |
| Q9 | 0.308 | 80.18 |
| Q10 | 0.160 | 76.00 |

Tabla 2.7. *Parámetros principales de los imanes de focalización de la celda 9BA.*

2.2. Red magnética no lineal

El desafío más importante en el diseño de la red magnética de un acelerador circular de baja o ultra-baja emitancia es la determinación de un arreglo de sextupolos capaz de corregir las cromaticidades naturales y que simultáneamente optimice la apertura dinámica. De hecho, la optimización no lineal del anillo de almacenamiento es lo que toma más tiempo en el diseño de una fuente de luz, alrededor de tres años, ver por ejemplo [2,7,14]. Este tipo de aceleradores circulares tienen un número grande de imanes de desvío, por lo que las intensidades de sus campos magnéticos son bajas, como consecuencia son necesarios cuadrupolos más intensos para mantener focalizado el haz de electrones ya que la dispersión ocasionada por los imanes de desvío es pequeña. Esto provoca que las cromaticidades naturales sean muy grandes y negativas, generándose las llamadas inestabilidades de cabeza-cola (*head-tail*) que potencialmente pueden destruir el haz de electrones y reducen drásticamente su tiempo de vida medio. Para controlar

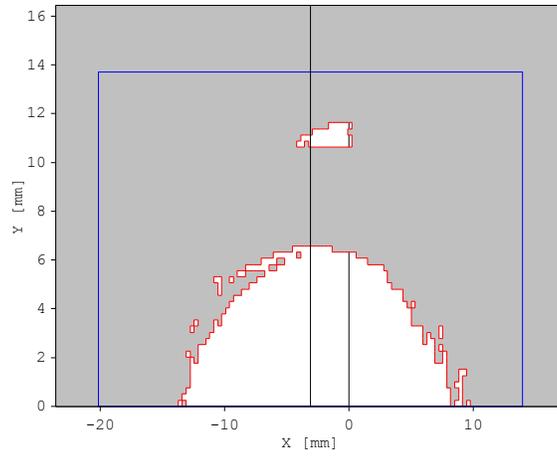
dichas inestabilidades las cromaticidades lineales deben ser corregidas a valores positivos en un rango entre 0 y 5 [9]. Entonces, es necesario introducir en la red magnética sextupolos muy intensos para la corrección de las cromaticidades. Un efecto indeseable de la introducción de dichos sextupolos cromáticos en la red magnética es la destrucción de la *apertura dinámica* (es decir, la región en el espacio fase donde el haz de electrones es estable), por lo que es necesario introducir sextupolos adicionales para optimizar la apertura dinámica. El problema radica en que los sextupolos son elementos magnéticos no-lineales y por lo tanto la dinámica de los electrones adquiere un comportamiento no-lineal. En consecuencia, si su intensidad es muy grande también lo son los efectos no-lineales y, como es bien conocido, controlar esta clase de efectos es un problema altamente no trivial.

Es importante señalar entonces que los esquemas de sextupolos para los anillos de almacenamiento de la MLS que estamos proponiendo, aun cuando tienen un buen desempeño, necesitan ser perfeccionados usando algoritmos más sofisticados para que la estabilidad del haz de electrones sea lo más robusta posible. También hay que señalar que este tipo de algoritmos demandan una gran cantidad de recursos que no se pueden obviar porque se compromete el funcionamiento correcto de la fuente de luz.

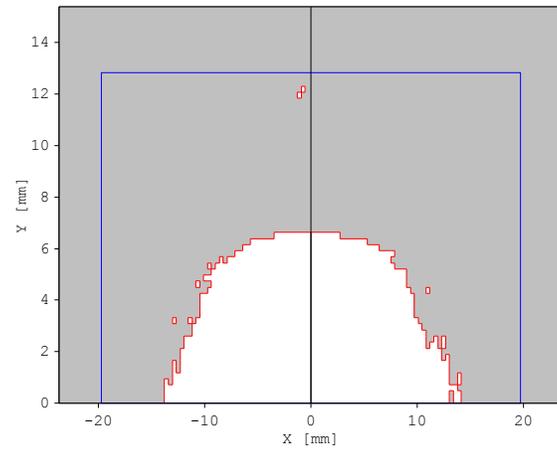
2.2.1. Modelo MLS-DBA

Las cromaticidades naturales del anillo de almacenamiento MLS-DBA son -62.08 y -39.40 para la horizontal (C_x) y vertical (C_y), respectivamente, como hemos mencionado dichos valores no son excesivamente grandes por lo que su corrección y la optimización simultánea de la apertura dinámica no es un problema sumamente complicado. Para esto usamos 9 familias de sextupolos ($SF1, \dots, SF4, SD1, \dots, SD5$) distribuidos como se muestra en la sección 2.1.1, debido a la longitud y cantidad de los espacios que ofrece la red magnética lineal fue posible ubicar los sextupolos en su posición óptima. Es importante mencionar que esta es otra de las ventajas que ofrecen las celdas DBA.

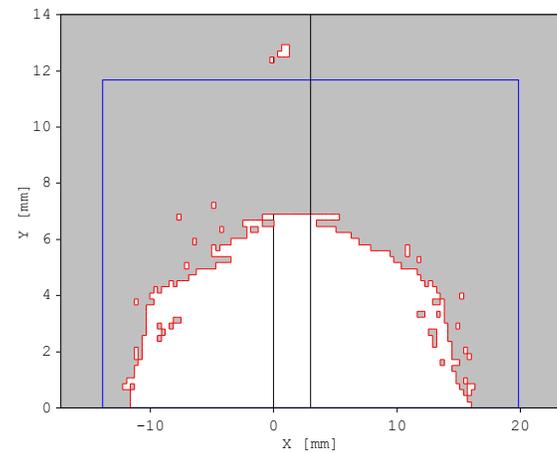
Como resultado, las intensidades de dichos elementos magnéticos son perfectamente factibles con materiales convencionales, como el hierro. En la tabla 2.8 se dan los parámetros principales de los sextupolos del anillo de almacenamiento MLS-DBA. Las cromaticidades se corrigieron a los valores $C_x=+1$ y $C_y=+1$, y la apertura dinámica en el plano transversal x - y , en medio de las secciones rectas lar-



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8. Apertura dinámica en las secciones rectas largas del anillo de almacenamiento MLS-DBA, para (a) $dp/p=-2\%$, (b) $dp/p=0\%$, (c) $dp/p=+2\%$. Los resultados se obtuvieron con OPA.

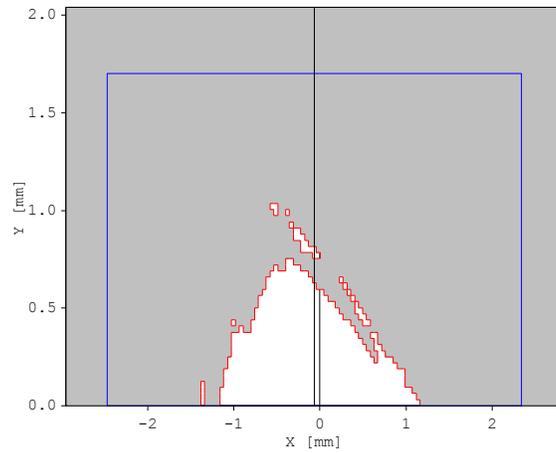
| Familia | Longitud [m] | Intensidad máxima ($ B'' $) [T/m ²] |
|---------|--------------|--|
| SF1 | 0.15 | 420.3 |
| SF2 | 0.22 | 924.8 |
| SF3 | 0.22 | 709.6 |
| SF4 | 0.15 | 860.5 |
| SD1 | 0.15 | 729.7 |
| SD2 | 0.15 | 421.1 |
| SD3 | 0.15 | 1678.7 |
| SD4 | 0.22 | 770.4 |
| SD5 | 0.15 | 1151.5 |

Tabla 2.8. *Parámetros principales de los sextupolos del anillo de almacenamiento MLS-DBA.*

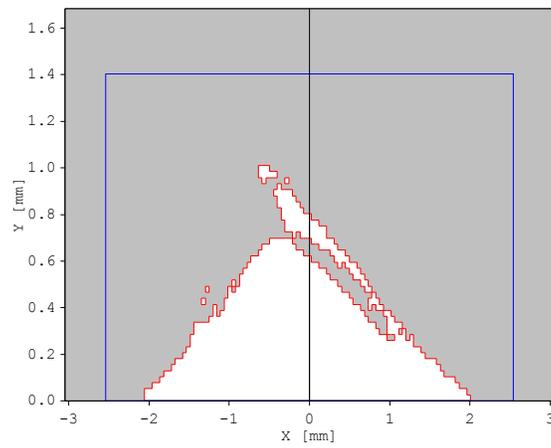
gas, se muestra en la figura 2.8 cuando las electrones tienen la energía de diseño ($dp/p=0$) y cuando la energía está un 2% fuera de su valor nominal ($dp/p=\pm 2\%$). Notemos que la apertura dinámica es aproximadamente de 20 mm×10 mm incluyendo variaciones de energía de hasta un 2%. Esto garantiza la estabilidad del haz, aunque la desviación en la energía dp/p debe ser ampliada para asegurar que la estabilidad sea más robusta y que todos los errores posibles de una máquina real sean irrelevantes para su funcionamiento. La apertura dinámica actual permite implementar un sistema de inyección convencional sin limitaciones importantes, sin embargo, para que la inyección tenga una mayor eficiencia es necesario ampliarla unos cuantos milímetros más.

2.2.2. Modelo MLS-9BA

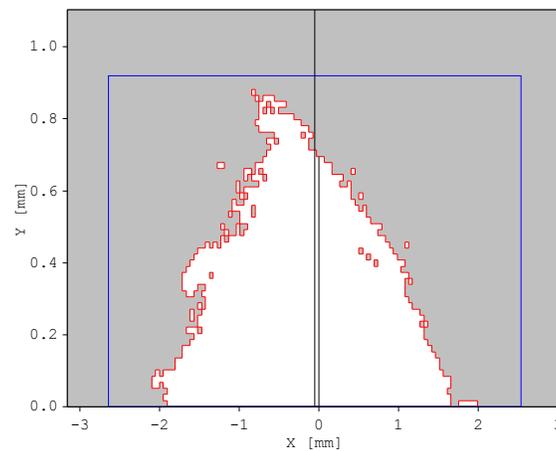
El anillo de almacenamiento MLS-9BA, a diferencia del MLS-DBA, tiene una red magnética de ultra-baja emitancia, de hecho la emitancia del primero es casi 11 veces más pequeña que la del segundo. Como consecuencia, las cromaticidades naturales en este caso, $C_x=-77.94$ y $C_y=-81.89$, son más grandes que las del anillo de almacenamiento MLS-DBA, $C_x=-62.08$ y $C_y=-39.40$. Por ello es de esperarse que la corrección de las cromaticidades y la optimización de la apertura dinámica para el presente modelo sea un problema mucho más complejo. Debido a que nuestra celda 9BA es muy compacta, uno de los problemas principales es la falta de espacio para los elementos magnéticos no-lineales. Esto nos obligó a introducir campos sextupolares en los componentes lineales, de otra manera la corrección de las cro-



(a)



(b)



(c)

Figura 2.9. Apertura dinámica en las secciones rectas del anillo de almacenamiento MLS-9BA, para (a) $dp/p=-1.9\%$, (b) $dp/p=0\%$, (c) $dp/p=+1.9\%$. Los resultados se obtuvieron con OPA.

| Familia | Tipo | Longitud [m] | Intensidad máxima ($ B'' $) [T/m ²] |
|---------|-----------|--------------|--|
| S1 | Dedicado | 0.10 | 3325.7 |
| S2 | Dedicado | 0.20 | 7395.5 |
| S3 | Dedicado | 0.10 | 4500.1 |
| S4 | Dedicado | 0.10 | 4500.1 |
| S5 | Dedicado | 0.20 | 10006.9 |
| S6 | Integrado | -- | 818.1 |
| S7 | Integrado | -- | 2001.4 |
| S8 | Integrado | -- | 2001.4 |

Tabla 2.9. Parámetros principales de los sextupolos del anillo de almacenamiento MLS-9BA.

maticidades no es posible. Obviamente, en este caso se deben seguir realizando estudios sobre la red magnética no-lineal para perfeccionarla.

Las cromaticidades se corrigieron a los valores $C_x=+1$ y $C_y=+1$, mientras que la apertura dinámica fue posible optimizarla hasta un tamaño ligeramente inferior a la de ALS II [4]. En la figura 2.9 se muestra la apertura dinámica en el plano transversal x - y , en la parte central de las secciones rectas, para tres casos: cuando los electrones tienen la energía de diseño ($dp/p=0$) y cuando la energía presenta una desviación de 1.9% respecto a su valor nominal ($dp/p=\pm 1.9\%$). El tamaño de la apertura dinámica, $\sim 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, como lo hemos mencionado anteriormente, demanda un sistema de inyección diferente a los que actualmente se usan en las fuentes de luz de tercera generación. El sistema de inyección de intercambio (*swap-out*) [3] propuesto para ALS II es, claramente, la elección más lógica para este posible anillo de almacenamiento de la MLS. La red magnética no-lineal de nuestra celda 9BA consiste de 5 familias de sextupolos dedicados ($S1, \dots, S5$) y tres familias de campos sextupolares integrados ($S6, S7, S8$) a algunos elementos lineales de la celda. La distribución precisa de ambos tipos de sextupolos se da en la sección 2.1.2, y sus parámetros más importantes se dan en la tabla 2.9.

Debido a que las redes magnéticas de ultra baja emitancia son altamente no-lineales, se debe considerar el uso de los llamados algoritmos genéticos o MOGA (por sus siglas en inglés: *Multi-Objective Genetic Algorithm*). Con estos algoritmos es posible explorar casi todas las configuraciones de una red magnética dada y de esta manera determinar aquella que brinde la mayor apertura dinámica. La enorme desventaja es que su implementación demanda muchos recursos humanos y

computacionales, ver por ejemplo [21], con los que no contamos por ahora. Sin embargo, su ventaja es que hacen posible una optimización simultánea de la óptica lineal y no lineal [22], de tal manera que la configuración final de la red magnética es inmejorable.

2.3. Otros modelos

Hemos descrito detalladamente los dos modelos, MLS-DBA y MLS-9BA, que proponemos para el anillo de almacenamiento de la MLS. Como hemos mencionado, el modelo basado en la celda DBA ofrece un desempeño de moderado a bueno (si se usan zigzageadores de amortiguamiento) pero su nivel de riesgo es bajo, mientras que el modelo basado en la celda 9BA ofrece un desempeño extraordinario pero su nivel de riesgo es elevado. La elección del modelo dependerá esencialmente del presupuesto para el proyecto y del nivel de riesgo que se quiera asumir. Recordemos que la tecnología de las celdas DBA, por ser la estándar actualmente, es menos costosa que la tecnología de las celdas MBA, la cual se encuentra en desarrollo. Teniendo en cuenta que estas decisiones están fuera del alcance del presente proyecto, nos parece pertinente incluir otro modelo para el anillo de almacenamiento que quizá representa un riesgo intermedio a los anteriormente presentados.

Este modelo del anillo de almacenamiento que se ha construido usando una celda 7BA, similar a la de MAX IV [2], lo denominamos MLS-7BA.

El anillo de almacenamiento MLS-7BA se compone de 15 celdas 7BA separadas por el mismo número de secciones rectas libres largas de 4.8 m. Cada celda 7BA está formada por 7 dipolos con campo gradiente, 16 cuadrupolos, 18 sextupolos y 6 octupolos, su distribución se indica en la figura 2.10, donde además se muestran las respectivas funciones ópticas. El resultado es un anillo de almacenamiento con una circunferencia de 396 m, una emitancia horizontal de 778 pm·rad y un punto de operación dado por los tonos betatrón ($Q_x=31.62$, $Q_y=12.58$), la energía se fijó en los 3 GeV. Observemos que la emitancia de este modelo es 1.4 veces menor que la del modelo MLS-DBA y 7.6 veces mayor que la emitancia del modelo MLS-9BA. El sistema de inyección necesita una sección recta larga, así que este modelo tiene espacio para 14 dispositivos de inserción que brindarían luz de excelente calidad a 14 terminales experimentales.

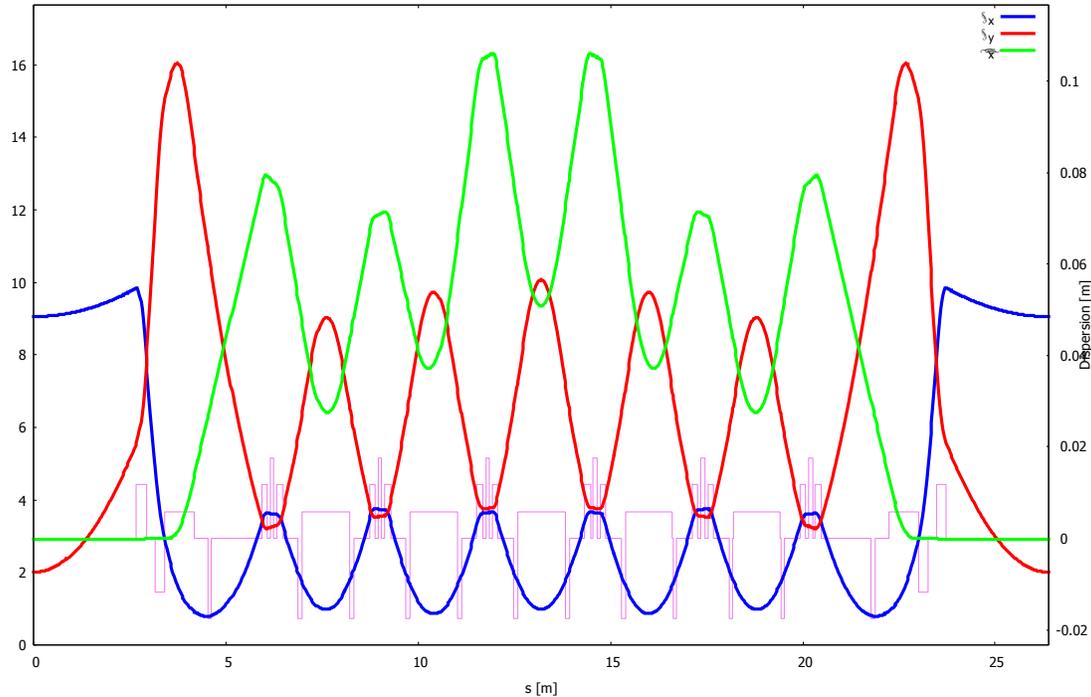
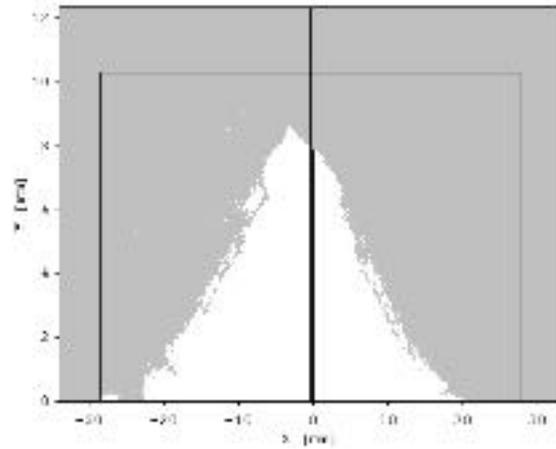
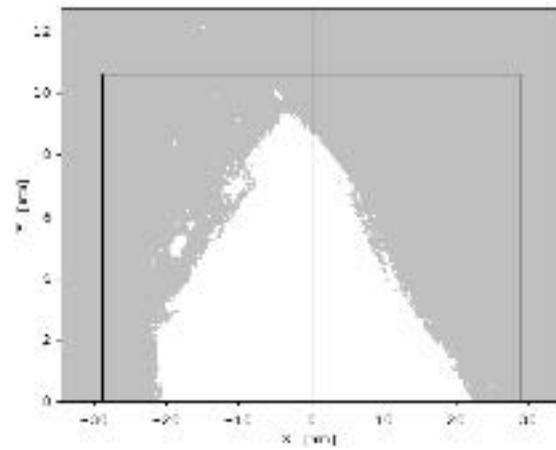


Figura 2.10. Funciones ópticas de un super-periodo del anillo de almacenamiento MLS-7BA, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente, y en violeta se indica el arreglo de imanes.

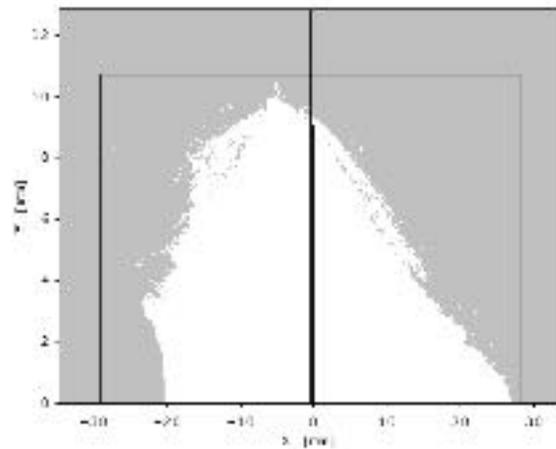
Es posible usar también la luz que se produce en los dipolos, de manera que si se usan los dipolos centrales de cada celda 7BA se obtendrían 15 terminales experimentales adicionales. Es decir, el anillo de almacenamiento MLS-7BA podría ofrecer hasta 29 líneas de luz. La celda 7BA tiene dos secciones rectas cortas de 1.3 m antes de los dipolos de los extremos, en las cuales caben perfectamente las cavidades del sistema de RF. Uno de los méritos más destacados de este modelo es que sus cromaticidades son muy bajas, $C_x = -37.57$ y $C_y = -37.00$, en comparación con las cromaticidades de los modelos MLS-DBA, $C_x = -62.08$ y $C_y = -39.40$, y MLS-9BA, $C_x = -77.94$ y $C_y = -81.89$. En consecuencia, la corrección de las cromaticidades, a los valores usuales $C_x = +1$ y $C_y = +1$, y la optimización de la apertura dinámica se pudo llevar a cabo sin grandes dificultades. La apertura dinámica en el plano x - y , en la parte central de las secciones rectas largas, se muestra en la figura 2.11 cuando la energía de los electrones es la nominal y cuando tiene una desviación del 2%. Notemos que su tamaño, 30 mm \times 15 mm, es más grande que la del modelo MLS-DBA, aun cuando este último tiene una emitancia menor.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11. Apertura dinámica en las secciones rectas largas del anillo de almacenamiento MLS-7BA, para (a) $dp/p=-2\%$, (b) $dp/p=0\%$, (c) $dp/p=+2\%$. Los resultados se obtuvieron con OPA.

3. Impulsor

En la configuración del impulsor de la MLS considerada se da prioridad a la reducción de costos y al tipo de inyección que demanda un anillo de almacenamiento de baja emitancia y consiste de una red magnética formada únicamente por celdas unitarias tipo FODO (acrónimo de *Focusing-Defocusing*) que hacen un anillo de circunferencia menor, pero muy cercana, a la circunferencia del anillo de almacenamiento, siendo ambos anillos concéntricos. De esta manera, el impulsor tiene una periodicidad alta que no sólo facilitaría su construcción sino que además simplifica su optimización no lineal. Este es un esquema similar al del impulsor de la nueva fuente de luz brasileña, SIRIUS [7].

3.1. Red magnética lineal

La celda unitaria del impulsor de la MLS es una celda FODO modificada, usualmente una celda FODO se compone de un cuadrupolo de focalización, uno de desfocalización y un dipolo, el cual se ubica entre los cuadrupolos. En cambio nuestra celda unitaria consiste únicamente de dos imanes: uno de desvío (B) y otro de focalización (QF), por supuesto, el imán de desvío tiene además un campo gradiente de desfocalización. En cualquiera de los casos se necesitan adicionalmente sextupolos para corregir las cromaticidades y optimizar la apertura dinámica, para ahorrar espacio y reducir costos decidimos integrar campos sextupolares a los imanes de desvío y focalización, de manera que sólo se necesitan dos familias de sextupolos dedicados (SH y SV) para completar el esquema no lineal de la red magnética. Así pues, los imanes de desvío poseen campos dipolares, cuadrupolares y sextupolares, y los imanes de focalización poseen campos cuadrupolares y sextupolares.

En las tablas 3.1 y 3.2 se dan las propiedades más relevantes de estos imanes combinados, que por ser similares a los que usan muchas fuentes de luz en sus impulsores son perfectamente factibles, algunos ejemplos son ALBA [5], SLS [6] y SIRIUS [7]. La configuración de los imanes de nuestra celda unitaria (FODO modificada) es la siguiente

$$(LSS/2, SV, D1, B, D1, SV, LSS, SH, D1, QF, D1, SH, LSS/2),$$

| Parámetros | Valores | Unidades |
|-------------------------------------|---------|------------------|
| Longitud | 1.0 | m |
| Ángulo de desvío | 9.0 | deg |
| Campo cuadrupolar máximo ($ B' $) | 2.54 | T/m |
| Campo sextupolar máximo ($ B'' $) | 58.43 | T/m ² |

Tabla 3.1. *Parámetros principales de los imanes de desvío del impulsor de la MLS.*

| Parámetros | Valores | Unidades |
|-------------------------------------|---------|------------------|
| Longitud | 0.36 | m |
| Campo cuadrupolar ($ B' $) | 12.01 | T/m |
| Campo sextupolar máximo ($ B'' $) | 45.36 | T/m ² |

Tabla 3.2. *Parámetros principales de los imanes de focalización del impulsor de la MLS.*

| Parámetros | Valores | Unidades |
|--|-----------------------|------------------|
| Energía de extracción | 3.0 | GeV |
| Energía de inyección | 150 | MeV |
| Corriente | 2.0 | mA |
| Circunferencia | 374.4 | m |
| Frecuencia de revolución | 0.801 | MHz |
| Periodo de revolución | 1.249 | μs |
| Frecuencia del ciclo | 2 | Hz |
| Tonos betatrón, horizontal | 17.86 | |
| vertical | 6.33 | |
| Factor de compactación de ímpetu | 5.63×10^{-4} | |
| Cromaticidad natural, horizontal | -59.42 | |
| vertical | -12.16 | |
| Emitancia, horizontal | 3635 | pm·rad |
| vertical (sin acoplamiento) | 0.30 | pm·rad |
| Tiempos de amortiguamiento, horizontal | 6.0 | ms |
| vertical | 6.7 | ms |
| longitudinal | 3.5 | ms |
| Número de imanes de desvío | 40 | |
| Longitud de los imanes de desvío | 1.0 | m |
| Campo dipolar (mínimo/máximo) | 0.0786/1.572 | T |
| Radio de curvatura | 6.366 | m |
| Número de QFs | 40 | |
| Campo gradiente ($ B' $) máximo | 12.01 | T/m |
| Número de pares (SH, SV) | 80 | |
| Campo sextupolar ($ B'' $) máximo | 234.0 | T/m ² |
| Frecuencia del sistema de RF | 499.654 | MHz |
| Número armónico | 624 | |

Tabla 3.3. *Parámetros principales del anillo impulsor de la MLS.*

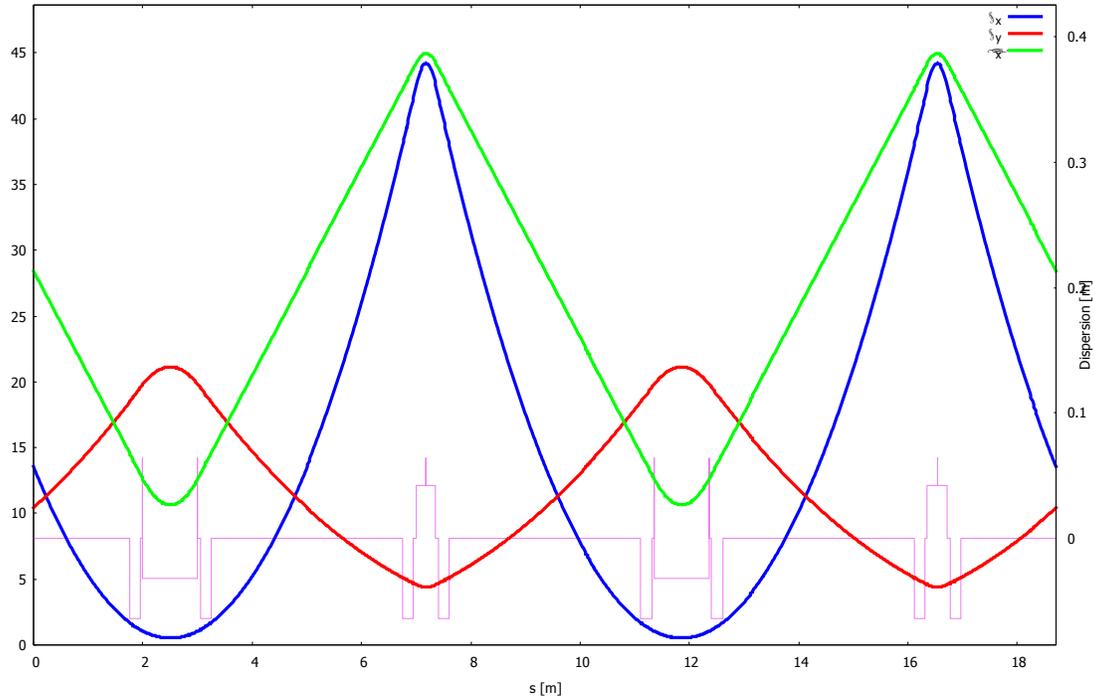


Figura 3.1. Funciones ópticas de dos celdas unitarias del impulsor de la MLS, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente; en violeta se indica el arreglo de imanes. Estos resultados se obtuvieron con el programa OPA.

donde DI es un espacio libre de 0.05 m entre los imanes y LSS es una sección recta larga de 3.5 m. El ángulo de desvío de la celda unitaria, y por lo tanto de B , es de 9° y su longitud total (es decir, incluyendo las secciones rectas libres) es de 9.36 m. Las funciones ópticas de dos celdas FODO modificadas se muestran en la figura 3.1, en verde se muestra la dispersión horizontal, en azul y rojo se muestran las funciones betatrón horizontal y vertical, respectivamente, en violeta se indica el arreglo de imanes.

El impulsor de la MLS está formado por 40 celdas FODO modificadas, que forman un anillo de 374.4 m. La energía de los electrones cuando se inyectan es de 150 MeV y se extraen a una energía de 3 GeV, la emitancia horizontal a la energía de extracción es de 3635 pm·rad. En la tabla 3.3 se muestran los parámetros principales del anillo impulsor de la MLS, cuyo punto de operación está dado por los tonos betatrón ($Q_x=17.86$, $Q_y=6.33$) y fue elegido por brindar una buena estabilidad del haz de electrones. En la figura 3.2 se muestra el punto de operación del impulsor, en una gráfica de tonos donde se muestran las resonancias hasta quinto orden.

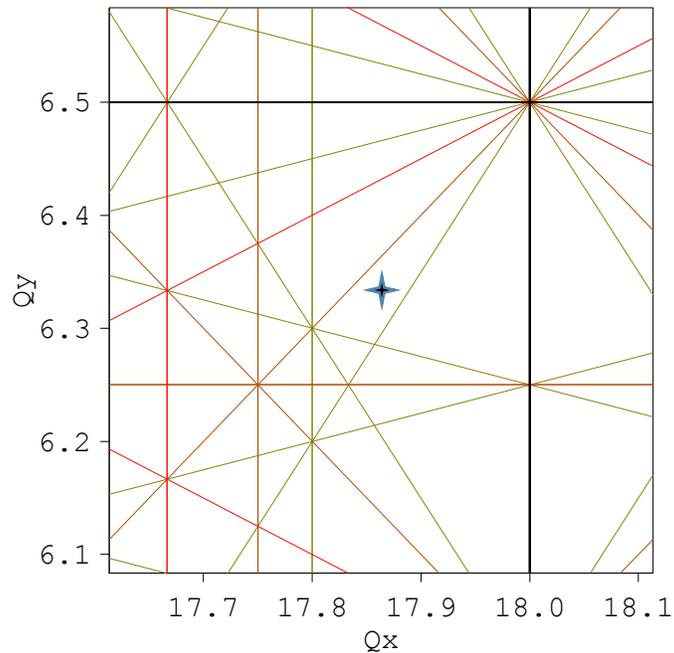
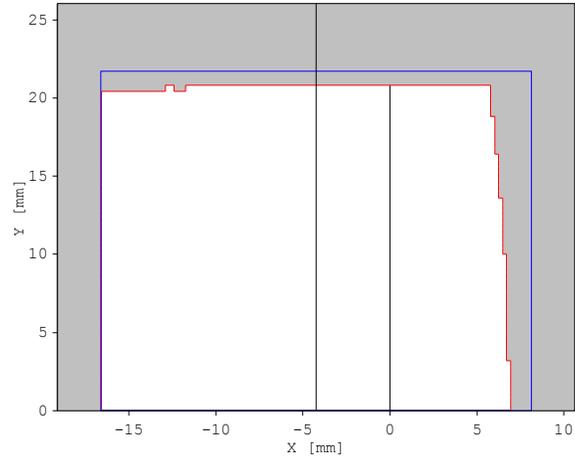


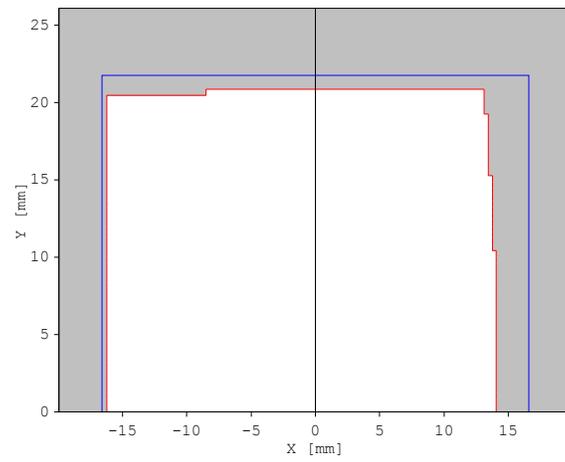
Figura 3.2. Gráfica de tonos donde se muestra el punto de operación del impulsor de la MLS ($Q_x = 17.86$, $Q_y = 6.33$); se muestran resonancias hasta quinto orden. La gráfica se obtuvo usando el programa OPA.

3.2. Red magnética no lineal

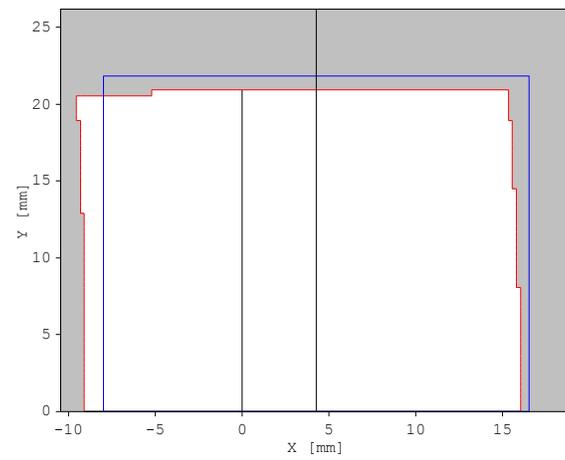
Las cromaticidades naturales del impulsor ($C_x = -59.4$, $C_y = -12.2$) son bajas en comparación con las cromaticidades naturales del anillo de almacenamiento, sin embargo estas son grandes si hacemos la comparación con otros impulsores, por ejemplo, el impulsor de SIRIUS tiene ($C_x = -35.7$, $C_y = -14.2$) y el de ALBA tiene ($C_x = -16.6$, $C_y = -10.2$). Esto se debe a la baja emitancia de nuestro impulsor en proporción al tamaño de su circunferencia. Por esta razón, es más complicado corregir la cromaticidad y mantener una buena apertura dinámica de manera simultánea. Existen dos caminos para lograrlo, el primero es introducir un número grande de sextupolos cromáticos para evitar que sus intensidades sean demasiado grandes, junto con los efectos no lineales indeseables, y entonces el esquema de sextupolos geométricos será fácil de implementar. El segundo camino es introducir un número menor de sextupolos para corregir las cromaticidades pero con intensidades más grandes, en este caso se vuelve muy complicado determinar un esquema de sextupolos geométricos que optimicen la apertura dinámica. Aquí, por simplicidad para el esquema de corrección elegimos el primer camino. En total te-



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3. Apertura dinámica en las secciones rectas libres del impulsor de la MLS, para **(a)** $dp/p = -4\%$, **(b)** $dp/p = 0\%$, **(c)** $dp/p = +4\%$.

| Familia | Tipo | Longitud [m] | Intensidad máxima (B'') [T/m ²] |
|---------|-----------|--------------|--|
| SH | Dedicado | 0.2 | 99.6 |
| SV | Dedicado | 0.2 | 234.0 |
| QF | Integrado | 0.36 | 45.4 |
| B | Integrado | 1.0 | 58.4 |

Tabla 3.4. *Parámetros principales de los sextupolos del impulsor de la MLS.*

nemos 240 sextupolos divididos en 4 familias, 2 de sextupolos dedicados (*SH* y *SV*) y 2 de sextupolos integrados en *B* y *QF*. En la tabla 3.4 se indican los parámetros principales de los sextupolos del impulsor que corrigen las cromaticidades a los valores ($C_x=+0.5$, $C_y=+0.5$) y al mismo tiempo optimizan la apertura dinámica. Esta última resultó ser muy buena incluso cuando tenemos desviaciones de la energía nominal hasta de 4%, ver la figura 3.3, por lo que la estabilidad del haz de electrones está asegurada en un radio de 7 mm.

4. Cañón de electrones y acelerador lineal

Una fuente de luz sincrotrón es esencialmente un acelerador de electrones e^- que produce luz. Los electrones se extraen de un cátodo en el *cañón de electrones* (o *e-gun*), el primer acelerador. Existen diferentes mecanismos de extracción [23,24], por ejemplo, mediante la aplicación de un campo eléctrico intenso, de pulsos de un láser o de una alta temperatura. El último mecanismo es el más usado en las fuentes de luz sincrotrón, ya que los dispositivos, llamados *cátodos termoiónicos*, son baratos, confiables, su tecnología está bien desarrollada y además generan una corriente grande. La densidad de corriente generada por un cátodo termoiónico está determinada por la ecuación de Richardson-Dushman [24],

$$J = AT^2 \exp\left[-\frac{e\Phi}{k_B T}\right],$$

donde A es una constante que depende del material, T es la temperatura absoluta de emisión del material, k_B la constante de Boltzmann, e la carga del electrón y Φ es la función de trabajo del material. Como un ejemplo, en la figura 4.1 se muestra una gráfica de la corriente como función de la temperatura para un cátodo de tungsteno.

Para la MLS proponemos un cañón de electrones típico, con emisión termoiónica y los parámetros principales que se muestran en la tabla 4.1. Con estos parámetros la emitancia mínima [23]

$$\varepsilon_{thermoionic}^{min} = \sigma_x \sqrt{\frac{k_B T}{mc^2}}$$

de nuestro cañón de electrones, suponiendo que el cátodo sea de tungsteno, será de

$$\varepsilon_{thermoionic}^{min} \cong 10 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

Además, la velocidad final de los electrones será de $0.6 c$, es decir, se moverán al 60% de la velocidad de la luz.

En un acelerador de partículas, como un sincrotrón, un haz de electrones es en realidad un tren de paquetes de electrones, la estructura temporal y espacial del

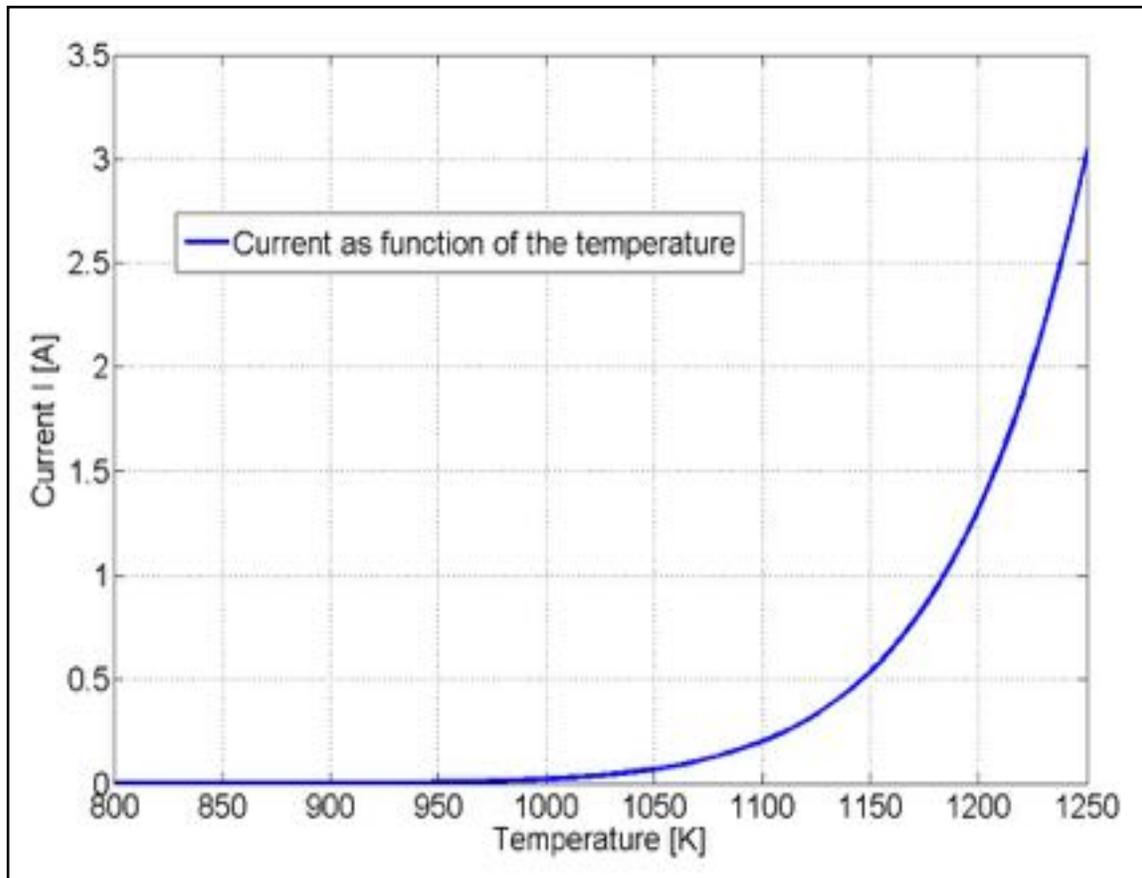


Figura 4.1. Gráfica de la corriente como función de la temperatura según la ecuación de Richardson-Dushman [23].

| | | |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| Área del cátodo | 0.5 cm ² | |
| Distancia cátodo-ánodo | 30 mm | |
| Voltaje | 90 kV | |
| Energía máxima de los electrones | 639 keV | |
| | Paquete único | Paquetes múltiples |
| Divergencia del haz | 6 mrad | 9 mrad |
| Radio del haz | 2.9 mm | 1.8 mm |

Tabla 4.1. Parámetros principales de un cañón de electrones típico para fuentes de luz sincrotrón de tercera generación.

mismo depende del sistema de RF usado, y es en el acelerador lineal (o *linac*) donde se da dicha estructura a los electrones.

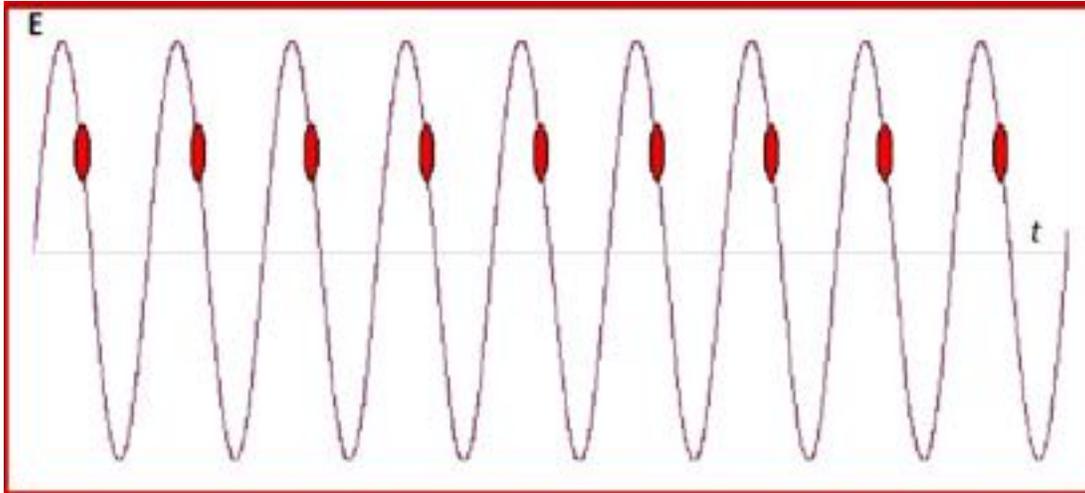


Figura 4.2. Ilustración de la evolución temporal del campo eléctrico en una cavidad de RF, los electrones son acelerados o desacelerados dependiendo de la dirección del campo eléctrico que les toque mientras atraviesan la cavidad de RF.

En la actualidad los dispositivos más usados para esto son las cavidades de radio frecuencia, las cuales producen un campo eléctrico que varía periódicamente en el tiempo como se muestra en la figura 4.2. De tal forma que algunos electrones serán acelerados mientras que otros se desacelerarán; los primeros se irán agrupando en paquetes que formarán el haz. Además de fijar la estructura del haz de electrones, una cavidad de RF sirve para acelerar los electrones [23,24]. Un *linac* típico de un sincrotrón acelera los electrones hasta una energía que comúnmente se encuentra entre los 100 y 200 MeV.

Para la MLS se puede considerar un acelerador lineal formado por un pre-empaquetador (*pre-buncher* en inglés) de electrones, un empaquetador y tres secciones de aceleración, formadas por cavidades de RF. El esquema del *linac* se muestra en la figura 4.3. Los dispositivos que empaquetan los electrones están compuestos esencialmente por cavidades de RF y solenoides. Debido a la divergencia intrínseca del haz de electrones (por su fuente) es necesario incluir un conjunto de cuadrupolos que focalicen el haz. De esta manera, en el *linac* el movimiento de los electrones se orienta usando dos elementos magnéticos: solenoides y cuadrupolos. Cabe mencionar que usualmente las fuentes de luz sincrotrón operan con varios paquetes de electrones (*modo multi-paquetes*), sin embargo, algunas técnicas experimentales requieren el poder operar con un solo paquete de electrones [25,26]. Finalmente, debemos tener en mente que el cañón de electrones y el *linac* deben estar optimizados para el modo de inyección de *relleno*

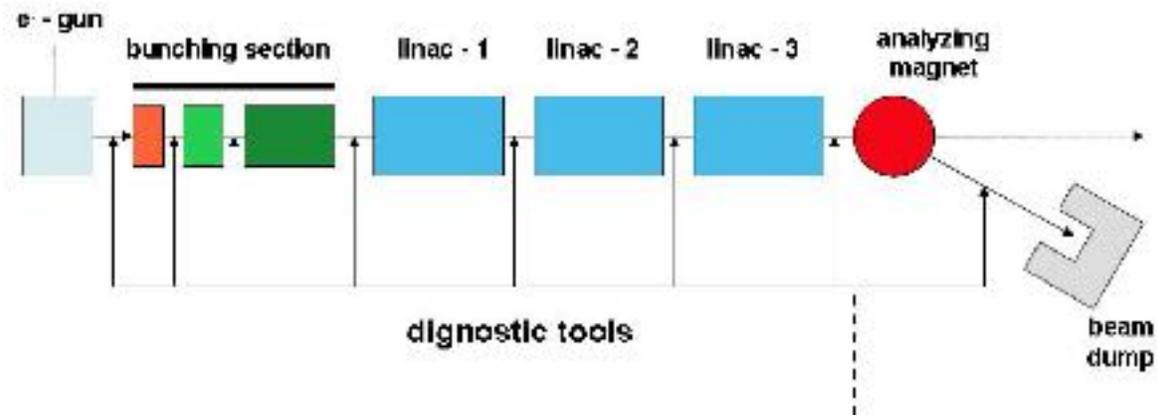


Figura 4.3. Esquema del acelerador lineal [27] propuesto para la MLS, únicamente se muestran los principales componentes: cavidades de radio frecuencia, solenoides, cuadrupolos y el cañón de electrones.

| Modo de operación | Múltiples paquetes | Un solo paquete | |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|
| Parámetro | | | Unidades |
| Energía final | 150 | 150 | GeV |
| Frecuencia | 3 | 3 | GeV |
| Emitancia normalizada | 3 | 3 | π mm·mrad |
| Dispersión relativa de la energía (rms) | <0.5 | <0.5 | % |
| Variación de la energía de pulso a pulso | <0.25 | <0.25 | % |
| Tolerancia entre pulsos | <100 | <100 | ps |
| Carga del pulso | >3 | >1 | nC |
| Duración del pulso | 100-300 | <1 | ns |
| Razón de repetición | 2 | 2 | Hz |

Tabla 4.2. Parámetros principales del acelerador lineal sugeridos para la MLS.

(o *top-up*) [8], que consiste en repetir periódicamente la inyección cuando se está dando servicio a los usuarios. La ventaja de este sistema de inyección es que se consigue una fuente estable de luz, de manera que las características de la luz producida se mantienen (casi) constantes durante la realización de los experimentos. Los parámetros principales del acelerador lineal que estamos proponiendo para la MLS se dan en la tabla 4.2.

Es importante mencionar que los parámetros que hemos propuesto para el cañón de electrones y el acelerador lineal podrían cambiar, sin embargo, debemos recordar siempre que los parámetros de diseño están determinados por el tiempo de

inyección esperado para llenar el anillo de almacenamiento desde cero en los modos de múltiples paquetes y de un solo paquete, y de acuerdo al desempeño esperado en el modo de operación de relleno.

5. Conclusiones

Una fuente de luz sincrotrón es una *máquina* muy compleja que se compone de muchos sistemas, no sólo de los aceleradores que hemos descrito, tales como los sistemas de extracción e inyección, RF, control, vacío, enfriamiento, por mencionar sólo algunos. Analizar, proponer y desarrollar cada uno de estos sistemas para la MLS es un trabajo que está fuera del alcance del presente proyecto, típicamente la elaboración de un reporte de diseño detallado le toma alrededor de 3 años a un grupo de aproximadamente unos 100 especialistas (ver por ejemplo [2,14]). Contando con el asesoramiento y supervisión de un grupo de expertos internacionales. Esta etapa de diseño debe ser el siguiente paso del proyecto.

Además, no se debe olvidar que las características específicas del acelerador, principalmente su tamaño y tecnología, las determinará el presupuesto total que se le asigne al proyecto.

Sin embargo, la red magnética del anillo de almacenamiento es el sistema más básico a partir del cual se diseñan y construyen todos los demás sistemas. En este reporte presentamos detalladamente dos propuestas para la red magnética del anillo de almacenamiento de la MLS, una de riesgo bajo (MLS-DBA) y otra de riesgo alto (MLS-9BA). Ambos diseños ofrecen un buen desempeño, aunque en cuanto a la calidad de la luz el de riesgo elevado es claramente superior. El diseño final dependerá del nivel de riesgo que se quiera asumir en este proyecto. Adicionalmente, también presentamos un diseño para el impulsor de la MLS.

En el desarrollo de los diseños que presentamos, se tomaron en cuenta las necesidades de los usuarios mexicanos de luz sincrotrón. Ya que el objetivo final de una fuente luz es brindar servicio a los usuarios. Y además contamos con el asesoramiento de expertos internacionales del área. Por lo tanto, nuestros diseños además de ofrecer un buen desempeño son perfectamente factibles. Sin embargo, estos deben ser perfeccionados, durante la siguiente etapa del proyecto, para que el funcionamiento del acelerador sea lo más estable posible.

Finalmente, nos gustaría mencionar que con la participación de un par de profesores de la UAEM y UNAM, estamos aprendiendo a usar los programas *Poisson* y *Opera* para diseñar los elementos magnéticos (como imanes) y eléctricos (como las cavidades de RF) de la MLS, así como *Elegant*. Esto nos permitirá implementar nuestros diseños de una forma más eficiente y realista en el mediano

plazo si el proyecto del sincrotrón continúa, y nos permitirá tener esquemas de diseño básicos que a su vez permitirán la eventual construcción de dichos elementos del sincrotrón mexicano.

Bibliografía

- [1] Soleil, France, [<http://www.synchrotron-soleil.fr/>].
- [2] Detailed Design Report on the MAX IV Facility, First Edition, 2010, [http://www.maxlab.lu.se/sites/default/files/DDR_MAX_IV_First_Edition_2010-08-25.pdf].
- [3] M. Borland, AIP Conference Proceedings **1234**, 2009.
- [4] H. Tarawneh, *et al.*, J. of Phys. Conference Series **493**, 012020 (2014).
- [5] <http://www.cells.es/es/aceleradores/operaciones>
- [6] <http://www.psi.ch/sls/accelerator>
- [7] SIRIUS Design Report, 2013's edition [<http://lnls.cnpem.br/sirius/>].
- [8] C. J. Bocchetta, *Top Up: Infinite Lifetime*, CAS: Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Brunnen, Switzerland, 2003.
- [9] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics*, Springer-Verlag, 3rd Edition, 2007.
- [10] S. Y. Lee, *Accelerator Physics*, World Scientific, 2nd Edition, 2004.
- [11] Andy Wolski, *Storage Ring Design*, Joint US-CERN-Japan-Russia School on Particle Accelerators, Erice, Sicily (Italy), 2011.
- [12] C. Steier, *Ultimate Storage Ring Based Light Sources, Comparison and Potential Synergies with ERLS*, ICFA Workshop on Future Light Sources: FLS 2012.
- [13] A. Streun, *OPA versión 3.39*, PSI, March 14, 2012.
- [14] NSLS-II Conceptual Design Report, December 2006, Brookhaven National Laboratory.
- [15] J. B. Murphy, *Synchrotron Light Source Data Book*, [<http://www.nsls.bnl.gov/newsroom/publications/otherpubs/dbook>].
- [16] D. Einfeld, D. Hussmann and M. Plesko, *Report ME-92-02*, August 1992, Bonn University, Bonn, Germany; D. Einfeld and M. Plesko, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **335**, 402-416 (1993).
- [17] A. Streun, The anti-bend cell for ultralow emittance storage ring lattices, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A737 (2014)148–154
- [18] Michael Borland, Glenn Decker, Louis Emery, Vadim Sajaev, Yipeng Sun and Aimin Xiao, Lattice design challenges for fourth-generation storage-ring light sources, J. Synchrotron Rad. (2014) 21, 912–936.
- [19] SSRF, Shanghai (China), [<http://www.ssrp.sinap.ac.cn/>].

- [20] H. Domínguez Sotelo, *Marco General para el Desarrollo de un Sincrotrón y la Optimización Elemental de su Emitancia*, Tesis de Maestría, ICF-UNAM, 2015.
- [21] X. N. Gavaldà, L. S. Nadolski and A. Díaz Ortiz, *Multi-Objective Optimization of the Non-Linear Beam Dynamics of Synchrotron SOLEIL*, IPAC 2014.
- [22] C. Sun, *et al.*, Phys. Rev. Spec. Top. –Acce. and Beams **15**, 054001 (2012).
- [23] R. Muñoz, *Injector system: the ALBA Linac*, Training courses for operators (2013), ALBA, Barcelona, Spain.
- [24] USPAS courses, *RF Acceleration in Linacs: Part 1*, [<http://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture4.pdf>].
- [25] C. Herring and M. H. Nichols, Rev. Mod. Phys. **21**, 185 (1949).
- [26] K. Holldack, *et al.*, Nature Communications **5**, 4010 (2014).
- [27] TPS Design Handbook, January 2009, NSRRC.



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Informe Inicial de un Estudio de Implantación de una Instalación de Luz de Sincrotrón en el Estado de Morelos: Complejo de Aceleradores, Edificios e Infraestructuras

Técnicas Reunidas
Master. Ingeniería Arquitectura



**INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA
INSTALACION DE LUZ DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS:
COMPLEJO DE ACELERADORES, EDIFICIOS E INFRAESTRUCTURAS**

Ref.: 02A/16



Marzo 2016

ÍNDICE

- 1.- Antecedentes
- 2.- Introducción
- 3.- Consideraciones generales
- 4.- Redes consideradas en este informe.
- 5.- Comparativa de los espectros de emisión de la LS emanada por los imanes de curvatura.
- 6.- Comparativa de los espectros de emisión de la LS emanada por un ondulator en vacío.
- 7.- Comparativa de los espectros de emisión de la LS emanada por wigglers multipolares.
- 8.- Sistemas de inserción a considerar para el uso potencial detectado a día de hoy.
- 9.- Criterios de protección radiológica
- 10.- Estudio de distribución de volúmenes en los edificios
- 11.- Estimación preliminar de los costes de inversión
- 12.- Una opción alternativa a la red MBA: Red 9BA
- 13.- Implantación Esquemática del Sincrotrón Mexicano en Terreno Ideal
- 14.- Planos

GLOSARIO

| | |
|------------------|---|
| Ee: | Energía de los electrones |
| ϵ_0 : | Emitancia natural |
| LS: | Luz de Sincrotrón |
| AA: | Anillo de Almacenamiento |
| LINAC: | Acelerador lineal donde se generan, se empaquetan y pre-aceleran los electrones. |
| Propulsor: | Acelerador circular donde los electrones se aceleran desde la salida del LINAC hasta la energía del AA al que son transferidos. |
| GeV: | Giga Electrón Voltio (mil millones de voltios) |
| MeV: | Mega Electrón Voltio (1 millón de voltios) |
| IC: | Imán(es) de Curvatura |
| DBA: | Red acromática extendida con dos IC con gradientes por celda |
| MBA: | Red acromática con 7 IC con gradiente por celda |
| 9BA: | Red acromática con 9 IC con gradiente por celda |
| ALBA: | Instalación española de LS |
| NIC: | Número de IC |
| NIC útiles: | Número de IC que se pueden usar para extraer la LS |
| SR: | Secciones rectas en el AA |
| SR útiles: | Secciones rectas disponibles para instalar dispositivos de inserción en el AA |
| SR-L: | Secciones rectas largas en el AA |
| SR-L útiles: | Secciones rectas largas disponibles para instalar dispositivos de inserción en el AA |
| T: | Tesla |
| BO(T): | Valor en unidades de Tesla del campo magnético en los IC. |
| $\Delta\theta$: | Deflexión angular media por IC |
| L: | Longitud del arco descrito por los electrones en un IC |
| ρ : | radio de curvatura en un IC |
| e: | carga de un electrón |
| p: | momento relativista de los electrones |
| A: | Amperios |

| | |
|------------------------|---|
| K: | Parámetro de deflexión en un dispositivo de inserción |
| MPW: | Dispositivo de inserción tipo “Wiggler” multipolar de bloque magnéticos permanentes |
| SCW: | Dispositivo de inserción tipo “Wiggler” multipolar con bobinas superconductoras |
| BMAX: | Máximo valor del campo magnético en un dispositivo de inserción. |
| s: | Segundo |
| mm: | Milímetro |
| μm : | Micrómetro |
| nm: | Nanómetro |
| mrاد: | Miliradián |
| $\Delta E/E$: | Resolución en energía de los fotones - o paso de banda - |
| Brillo: | Fotones/s/mm ² /mrاد ² en un $\Delta E/E = 0.001$ |
| β_x, β_y : | Funciones Twiss de transporte del tamaño del haz en la dirección horizontal y vertical, respectivamente. |
| Dx: | Dispersión del haz de electrones en la dirección horizontal (nula en la vertical). |
| σ_x, σ_y : | Mitad de la anchura a mitad de la altura de la distribución Gaussiana que describe el tamaño del haz luminoso en la dirección horizontal y vertical, respectivamente. |
| LL: | Línea de luz |
| mSV/año: | Dosis máxima de irradiación por encima de la radiación ambiental permitida al público. |

1. ANTECEDENTES

La **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** en adelante), a través de su **Instituto de Física (IFUNAM)** en adelante), solicita al Grupo Técnicas Reunidas desarrolle el presente informe, que permitirá definir, conceptual y preliminarmente un complejo de aceleradores y sus características para poder desarrollar en el Estado de Morelos una Fuente de Luz de Sincrotrón.

El Grupo TÉCNICAS REUNIDAS, ingeniería española con presencia en la Ciudad de México (mediante **TREUNIDAS MÉXICO INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN S. de R.L. de C.V**), ha desarrollado, a través de su participada MASTER, S.A. de Ingeniería y Arquitectura, los proyectos técnicos de Ingeniería y Arquitectura de la Fuente de Luz de Sincrotrón ALBA, diseñada entre los años 2005 y 2006 y construida en el periodo de 2006 a 2008.

Una vez finalizada la construcción, se procedió con la puesta en marcha de la instalación y todas las pruebas necesarias para poder dar servicio al mercado. La fuente de luz española está operativa desde el pasado año 2.011

El sincrotrón ALBA es una fuente de luz de sincrotrón ubicada en las cercanías de Barcelona, con una energía de 3 GeV (Giga Electronvoltios) y un anillo de almacenamiento de 270 metros de perímetro. La instalación tiene capacidad para albergar 32 beam lines (líneas de luz o LL) de las que en la actual fecha se encuentran en operación 10. La instalación ALBA fue concebida para una emitancia de 4,8 nm·radián y podrá albergar, en el futuro, una línea de experimentación extra larga de 120 metros de distancia.

Sirva, por tanto, el presente informe, para aproximar científicamente las prestaciones de la futura Fuente de Luz Mexicana, en base a la experiencia española y una serie de consideraciones y recomendaciones a tener en cuenta en el proceso de la selección de las características pre-definidas por la Universidad Nacional de México (UNAM) en cuanto a sus requisitos básicos y posibles emplazamientos en el Estado de Morelos.

2. INTRODUCCIÓN

La energía de los electrones (E_e) y la emitancia natural (ϵ_0) del Anillo de Almacenamiento (AA) son el punto de partida para evaluar las prestaciones de una instalación de Luz de Sincrotrón (LS).

Esto se debe a que E_e predetermina el rango energético de fotones útiles y ϵ_0 determina el brillo de estos fotones (el brillo de la fuente luminosa es inversamente proporcional a la emitancia del AA). Naturalmente, y como predice el principio de Liouville, el brillo de una fuente luminosa determina la calidad de las observaciones experimentales.

Los promotores de la instalación mexicana de LS desean tener acceso a fotones útiles dentro de un rango energético de hasta varias decenas de keV. Para ello se requiere una E_e de al menos 3 GeV.

Por otro lado se establece un objetivo para ϵ_0 del orden de 1 nm·radián o menor mientras se mantenga el perímetro del AA alrededor de 400 m. Estos han sido los criterios de partida que se han tomado para redactar este informe.

3. CONSIDERACIONES GENERALES

El brillo de la LS es inversamente proporcional a la emitancia del AA que la produce. En consecuencia, la tendencia es a reducir la emitancia al valor más bajo posible dentro del presupuesto disponible. Como primera aproximación la emitancia natural viene dada por la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_0 = \frac{C_q \gamma^2 \Delta\theta^3}{J_x} F$$

donde la constante $C_q = 3.8141 \times 10^{-13} \text{ m}$, γ^2 es el cuadrado del factor relativista de Lorentz, que para una energía de 3 GeV del AA es 3.4466528×10^7 , $\Delta\theta^3$ es la deflexión angular de los imanes de curvatura (IC), J_x es un número de partición cuyo valor es 1 para imanes de curvatura puramente bipolares pero que aumenta con el gradiente en estos imanes (J_x se puede aumentar hasta un máximo de alrededor de 2 introduciendo en la red wigglers multipolares con altos gradiente, algo no recomendable en la práctica!) y la función F depende de los detalles de la óptica magnética del AA.

Naturalmente, $\Delta\theta^3$ es proporcional al cubo de los imanes de curvatura presentes en la red.

En el caso de una red acromática con doble curvatura por celda la función F queda aproximado por:

$$F = \frac{l}{4\sqrt{15}}$$

Mientras que para una red acromática con múltiples curvaturas por celda F queda aproximado por:

$$F = \frac{1}{12\sqrt{15}} \frac{(M+1)}{(M-1)}$$

Donde M es el número de imanes de curvatura presentes en cada celda.

En una primera aproximación estas fórmulas pronostican que la emitancia de una red bajará con el cubo del número de IC que se utilicen y que una red con múltiples curvaturas por celda tendrá menor emitancia que una con doble curvatura por celda.

4. REDES CONSIDERADAS EN ESTE INFORME

Se han considerado dos AA basados en el concepto de un red acromática extendida, con dos imanes de curvatura (IC) por celda y con gradientes (5.78 T/m) que sean accesibles técnicamente (*“extended DBA with bending magnets with gradient”* o DBA a partir de ahora) y una red acromática modificada con 7 IC por celda y gradiente (9.00 T/m) en cada uno de ellos (*“multibend achromat with gradient in the bending magnets”* o MBA a partir de ahora). Esta red MBA es esencialmente idéntica a la propuesta recientemente por Dr. D. Einfeld y colegas.

Para poder comparar dos soluciones con el mismo tamaño, se ha impuesto que el perímetro del AA sea aproximadamente 400 m en ambos casos.

La Fig. 1 muestra un cuadrante con la distribución de los elementos cuadrupolares defocalizantes (cajas blancas con excursiones hacia arriba) y focalizantes (cajas blancas con excursiones hacia abajo), así como la distribución de los IC con gradiente (cajas negras) para una red DBA (esencialmente una extensión de la red DBA modificada que se ha usado en la construcción de ALBA) y para una red MBA con siete IC por celda.

El primer y el último IC por celda tienen la mitad de la extensión (es decir, producen la mitad de la curvatura) de la de los cinco IC centrales en la celda. La red de ALBA también se ha representado en la figura para comparar con una instalación que ha entrado recientemente en funcionamiento.

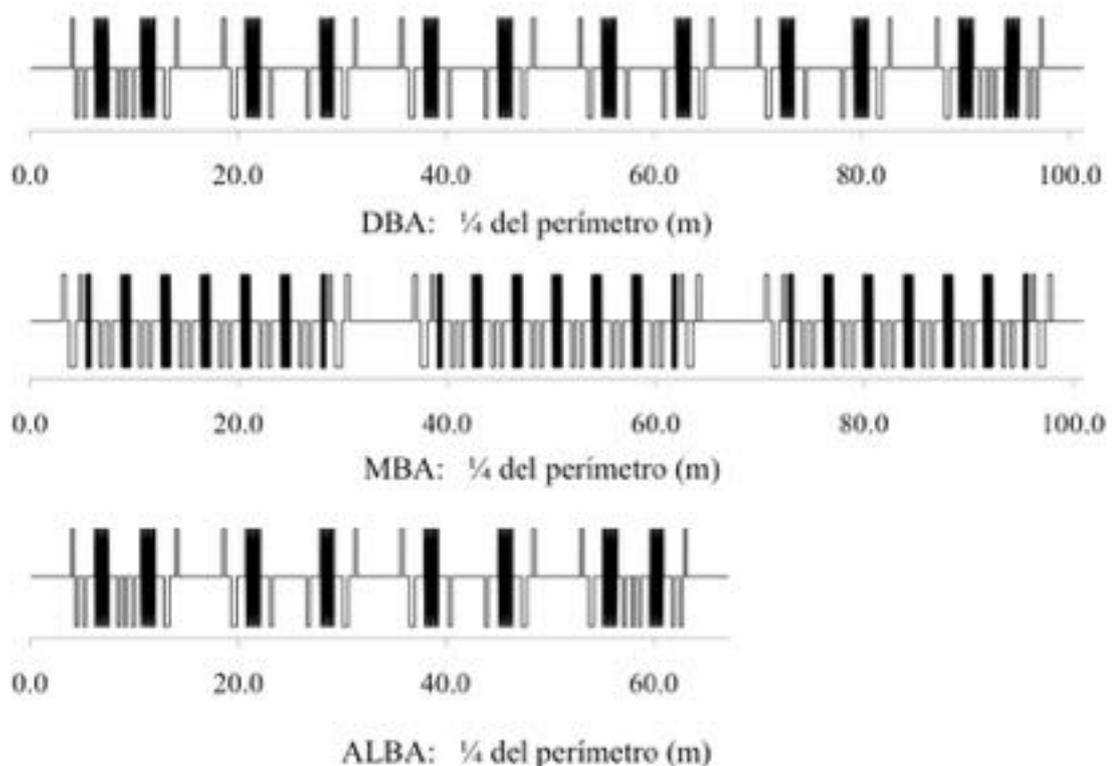


Fig. 1

En ningún caso se muestra la distribución de los sextupolos, cavidades de radiofrecuencia, monitores de posición, etc. Sin embargo estos han sido considerados en los cálculos que se presentan más abajo.

Una inspección somera de las redes muestra las ventajas y las desventajas de ambas soluciones.

Por un lado el número de IC es muy superior para la red MBA (84 IC con una deflexión media de 5°) que para la red DBA (48 IC con una deflexión de 7.5°).

Por razones del tamaño de la parcela disponible y, también por razones presupuestarias, ALBA solamente utiliza 32 IC con una deflexión de 11.25°.

Está claro que con respecto a la emitancia el mayor número de IC y también la función F da una ventaja competitiva a la red MBA. Por otro lado, es evidente también que debido al menor número de secciones rectas (SR), la eficiencia de explotación – definida como el número de secciones rectas disponibles por unidad de perímetro para la instalación de dispositivos de inserción - es inferior en la red MBA.

Esto queda patente en la Tabla1

| | ALBA | DBA | MBA |
|----------------------------|-------|-------|--------|
| Emitancia (ϵ_0) | 4.725 | 1.317 | 0.43 |
| Perímetro (m) | 268.8 | 405.9 | 404.8 |
| N_{IC} | 32.0 | 48.0 | 84.0 |
| N_{IC} útiles | 16.0 | 24.0 | 24.0 |
| SR-L | 4.0 | 4.0 | . |
| SR-L útiles | 3.0 | 3.0 | . |
| SR | 12.0 | 20.0 | 12.0 |
| SR útiles | 12.0 | 20.0 | 10 (*) |

(*) Probablemente dos SR se necesitan para inyección y cavidades de RF

Tabla 1

La Fig. 1 y la Tabla 1 muestran que para un perímetro dado, la disminución de la emitancia en la red MBA va acompañada de una reducción significativa en el número de SR disponibles para instalar sistemas de inserción.

Esto se debe a que para un perímetro dado, el mayor número de IC en una celda de una red MBA (7 en la comparación escogida) con respecto a los de una red DBA (2 imanes de

curvatura por celda) se consigue a cambio de reducir el número de SR disponibles para instalar la inyección, las cavidades de RF y dispositivos de inserción.

Las redes de la DBA y ALBA tienen cuatro secciones rectas largas (SR-L) con unos 8 m para instalar componentes. Al menos una de estas SR-L debe ser utilizada para la inyección y las otras 3 pueden ser usadas para sistemas de inserción.

Además la red DBA tiene 20 secciones rectas (SR) de unos 4 m para albergar sistemas de inserción. Debido a su menor perímetro ALBA solo tiene 12 SR.

En el caso de la DBA, asimismo como en el caso de ALBA, hay una serie de secciones rectas cortas distribuidas entre los dos IC de las celdas. Estas secciones rectas cortas son muy útiles para instalar, por ejemplo, las cavidades de RF sin necesidad de sacrificar ninguna SR para esta función.

En principio estas SR cortas pueden ser usadas para dispositivos de inserción, pero este aspecto no es considerado aquí. Por otro lado la red MBA solo tiene 12 SR con unos 5 m disponibles.

Por razones de espacio es probable que dos de estas SR no puedan usarse para albergar dispositivos de inserción ya que una se necesitará para la inyección y, posiblemente, otra se necesitará para las cavidades de RF.

Esta disyuntiva entre una menor emitancia o un mayor número de líneas de luz (LL) de alta calidad debe ser resuelta antes de entrar en el diseño de detalle de una instalación.

Una vez definidas las redes, en primera aproximación también quedan definidas las dimensiones mínimas del hall experimental.

Se define la losa crítica como la construcción altamente estable que soporta las LL y el complejo de aceleradores, es decir: *LINAC*, *BOOSTER* (PROPULSOR) y *ANILLO ALMACENAMIENTO*.

La losa crítica define una corona en la que los movimientos diferenciales, las vibraciones y los cambios de temperatura se han de reducir al mínimo compatible con los requerimientos de estabilidad mecánica y térmica (también eléctrica) dictada por el brillo de los haces de fotones.

Para definir las dimensiones del hall experimental y, en consecuencia, de la losa crítica se ha supuesto que algunas LL usarán espejos toroidales de rayos X con incidencias del haz en ángulo rasante (como, por ejemplo, es habitual en LL dedicadas a experimentos de dispersión de rayos X a ángulos bajos, cristalografía de proteínas o espectroscopia de rayos X duros).

Estos sistemas ópticos solamente están libres de aberraciones para distancias focales de 1:1 y de 2:1. Teniendo en cuenta que:

- i) la distancia entre la muestra y el detector en una LL para experimentos de dispersión de rayos X a ángulos bajos (que normalmente coincide con la posición del punto focal) debe ser al menos 5.5 m, y;

- ii) la distancia entre el último elemento óptico en la LL y la posición de la muestra debe ser dos veces la distancia entre la muestra y el punto focal para poder minimizar el ruido de fondo mientras se mantiene acceso al ángulo de medida más bajo posible,

se llega a la conclusión que la distancia mínima entre el último elemento óptico y el punto focal debe ser unos 16.5 m.

Este valor se ha ajustado a 17 m para dar un margen de seguridad, con el resultado de que la distancia mínima entre el centro de la sección recta y el punto focal debe ser al menos 51 m.

Con estos criterios el hall experimental se extiende hasta un radio de unos 87 m, con una anchura de la corona de la losa crítica de unos 40 m.

Se ha comprobado que se puede cubrir el área de esta corona con una grúa orbital cuyos fundamentos están desacoplados de la losa crítica. Este servicio será esencial cuando llegue el momento de instalar el complejo de aceleradores y las LL.

En la Fig. 2 se compara la distribución en el hall experimental de LL instaladas en SR en el caso de la red DBA y MBA. La Fig. 2 ilustra de nuevo la menor eficiencia de la red MBA en el uso de dispositivos de inserción.

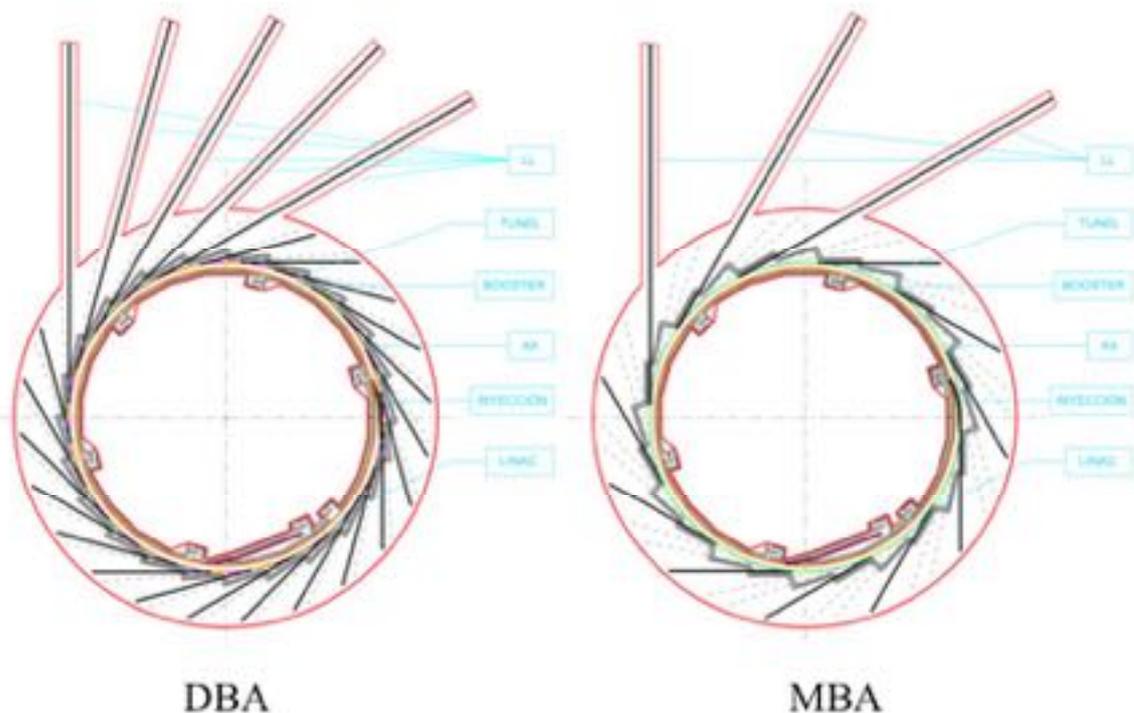


Fig. 2

Siguiendo los nuevos desarrollos que están apareciendo en el uso de las instalaciones de LS, se supone que el uso de LL con microfoco o que suministran radiación de rayos X coherentes será en algún momento un criterio importante para el programa científico a desarrollar en la instalación mejicana.

Para cubrir este objetivo, y como queda indicado en la Fig. 2, se propone alargar el espacio disponible en un lado de la instalación para la eventual instalación de LL de gran longitud (150 m en este caso).

En el caso de la red DBA se pueden instalar hasta 5 de estas LL mientras que solamente 3 son posible en el caso de la MBA. Esto se debe a que estas LL tiene que usar forzosamente dispositivos de inserción y como el ángulo entre ellos es de 15° y 30° para la red DBA y MBA, respectivamente, resulta que el espacio disponible para ello es menor en el caso de la red DBA.

Naturalmente, para redes magnéticas con un perímetro similar, el impacto principal que tienen es en la geometría de la pared de protección radiológica y en la salida de las LL largas, mientras el resto del edificio se mantiene prácticamente inalterado.

Para la comparativa que se presenta a continuación se han usado valores teóricos para todas las redes (incluyendo ALBA).

Este tipo de comparación resulta en valores correctos desde un punto de vista relativo, pero solamente aproximado desde un punto de vista absoluto. También se debe tener en cuenta que los resultados pueden ser mejorados introduciendo pequeños cambios en las posiciones y valores de los elementos magnéticos. Sin embargo, en primera aproximación las prestaciones relativas predichas para estas redes se mantendrán inalteradas.

La Tabla 2 muestra los valores teóricos de las funciones beta horizontales y verticales, de la dispersión y del tamaño de las sigmas horizontales y verticales en los puntos de posible instalación de sistemas de inserción (es decir en la SR-L y en SR) y en los IC.

| | ALBA SR-L | ALBA SR | ALBA IC | DBA SR-L | DBA SR | DBA IC | MBA SR | MBA IC |
|------------------------------|--------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| β_x (m) | 11.874 | 2.105 | 0.42 | 11.298 | 1.991 | 0.407 | 5.175 | 0.726 |
| β_y (m) | 6.927 | 1.442 | 12.789 | 7.161 | 1.465 | 21.933 | 2.278 | 9.952 |
| D_x (m) | 0.131 | 0.082 | 0.033 | 0.086 | 0.055 | 0.016 | 0.071 | 0.017 |
| σ_x (μm) | 262.4 | 123.4 | 53.4 | 143.6 | 70.8 | 26.9 | 79.3 | 23.0 |
| σ_y (μm) | 25.3 | 11.6 | 34.4 | 13.6 | 6.2 | 23.8 | 4.4 | 9.1 |

Tabla 2

En todos los cálculos que se presentan a continuación, se ha supuesto una corriente de electrones de 0.2 A y un acoplamiento del 2% en el AA. Con las técnicas de alineamiento disponibles hoy en día, esta es una estimación muy conservadora ya que, por ejemplo, en el caso de ALBA el acoplamiento está significativamente por debajo del 1%.

Comentamos de paso que la cromaticidad y la apertura dinámica de las redes aquí consideradas están dentro de niveles manejables de manera que aunque el estudio con inclusión de errores todavía no se ha llevado a cabo son redes que con toda probabilidad, como en el caso de ALBA, se pueden ejecutar con éxito.

5. COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS DE EMISIÓN DE LA LS EMANADA POR LOS IMANES DE CURVATURA.

Para una comparación de los espectros de emisión de luz de sincrotrón de diversos anillos de almacenamiento (AA) el punto de partida es la emisión proveniente de los imanes de curvatura (IC) ya que esta pre-determina el rango energético de los fotones con intensidades útiles que aquí definimos, un poco arbitrariamente, como aquellas que están un factor de 50 por debajo de las intensidades máximas dadas por la energía crítica, que en unidades prácticas vienen dada por:

$$E_c = 0,665 E_e^2 (GeV) B_0 (T)$$

Así pues, para un AA de 3GeV como los que consideramos en este informe, la energía crítica viene dada por

$$E_c = 5,98 B_0(T)$$

El campo magnético en un IC viene dado por la necesidad de curvar la trayectoria de los electrones con una deflexión de $360^\circ/N_b$, donde N_b es el número de IC en la red del AA.

La curvatura media por IC en las redes aquí consideradas es de $360^\circ/32$ para ALBA, $360^\circ/48$ para la DBA y de $360^\circ/72$ para la MBA.

Es decir una deflexiones medias 11.25° , 7.5° y 5° para la red de ALBA, la red DBA y la red MBA, respectivamente. En un IC la relación entre la deflexión ($\Delta\theta$), el radio de curvatura (ρ), el campo magnético (B_0) y el momento relativista de los electrones (p), viene dada por la expresión:

$$\Delta\theta = \frac{e}{p} B_0 L$$

Donde L es la longitud del arco descrito por los electrones y e es la carga del electrón. Para el caso de un AA con una energía de 3 GeV esta expresión se reduce a:

$$\Delta\theta = 0,0999 B_0 L$$

Así pues la deflexión viene dada por el valor de $B_0 L$, que dentro de ciertos límites se puede conseguir con una B_0 alta (típicamente con un máximo alrededor de 1.5 T) y una L corta o al revés.

En las redes que consideramos en este informe se usan imanes de curvatura con gradiente para que el valor de J_x aumente en un 25-30%.

En este estudio la longitud de los IC se ha fijado en 1.374 m (es decir, la misma longitud que los imanes usados por ALBA) para que su gradiente actúe satisfactoriamente.

La consecuencia es que en comparación con el caso de ALBA, el campo magnético B_0 es menor ya que la curvatura por IC debe reducirse desde 11.25° a 7.5° para la red DBA y a 5° para la red MBA.

El resultado es que la energía crítica de ALBA (8498.7 eV) es superior a la de las redes aquí presentadas (5665.8 eV y 5610.9 eV para la red DBA y MBA, respectivamente).

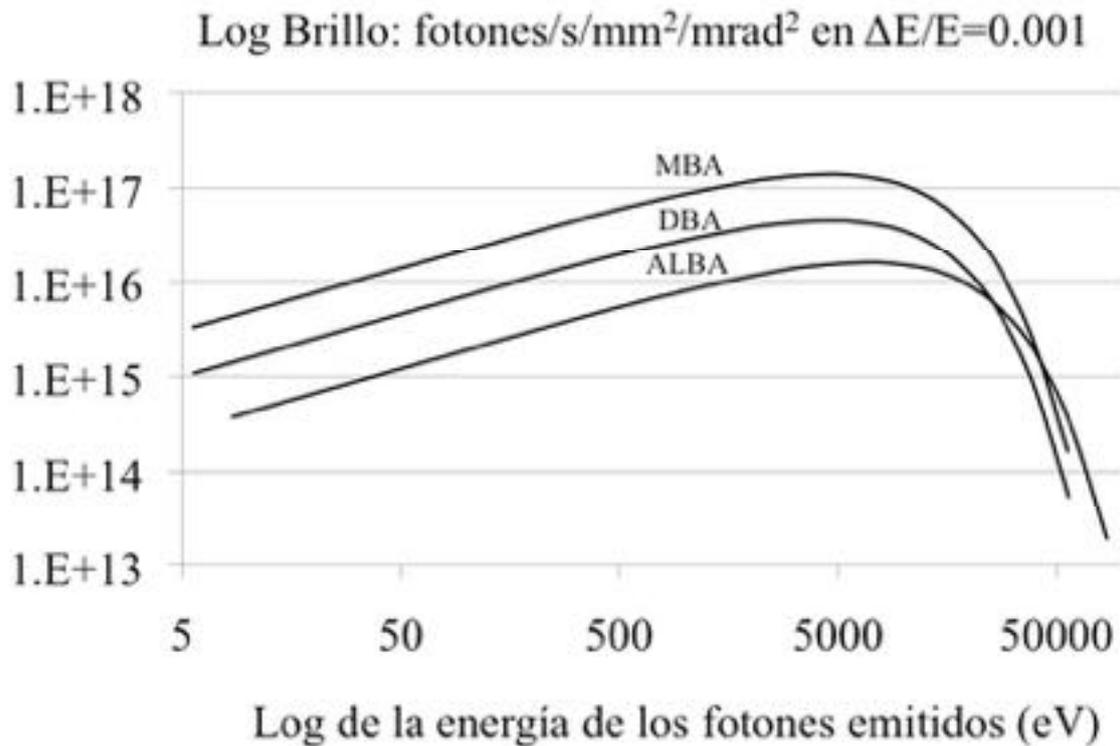


Fig. 3

La Figura 3 compara el brillo de la LS emitida por los imanes de curvatura en la MBA, DBA y en ALBA. Para los cálculos se ha supuesto una corriente de electrones de 0.2 A en el AA.

Se puede apreciar que la menor energía crítica de las redes DBA y MBA queda más que compensada por su mayor brillo.

6. COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS DE EMISIÓN DE LA LS EMANADA POR UN ONDULADOR EN VACÍO.

Un típico ondulator de vacíu para aplicaciones tales como cristalografía de proteínas o para estudios de dispersión de rayos X en material no cristalino (p.e. macromoléculas biológicas en solución, fibras macromoleculares, polímeros, etc.) podría ser uno con un gap mínimo de 0.57 cm, con 90 periodos de 2.2 cm y un campo magnético de 0.8 T (es decir un ondulator con una $K = 1.64$) cuando opera con el gap mínimo.

La Fig. 4 muestra el brillo de la emisión de rayos X de este ondulator si fuera instalado en una sección recta en ALBA (líneas negras), en la red DBA (líneas rojas) o en la red MBA (líneas azules).

Nótese que el brillo en la red MBA aumenta aproximadamente 4 veces con respecto a ALBA. Sin embargo, la diferencia entre el brillo del ondulator instalado en la red MBA o en la red DBA, no es tan significativa como lo es para los imanes de curvatura. Esto se debe a que la red DBA tiene una beta horizontal (función Twiss) significativamente más baja que la de la MBA en el centro de las secciones rectas destinadas a albergar ondulatores (véase Tabla 2) con el resultado que la menor emitancia de la MBA no se manifiesta en un tamaño más pequeño de la fuente luminosa en el centro de las secciones rectas.

Esta observación alerta de la importancia de optimizar las betas y la dispersión en todos los puntos de la red destinados a la explotación de la LS. Naturalmente, este es un tema a investigar durante la elaboración de un diseño detallado.

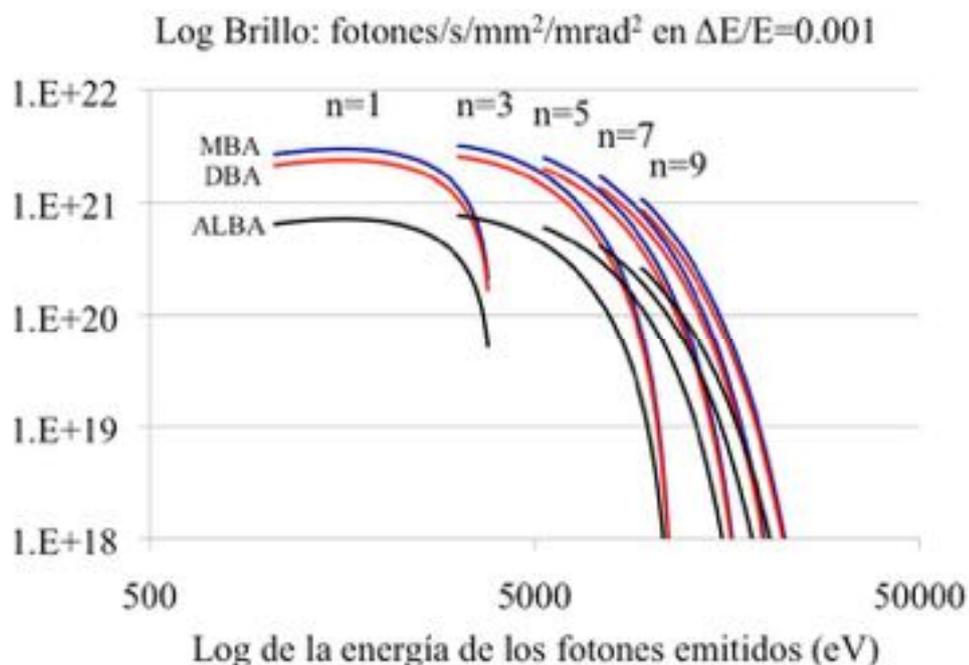


Fig. 4

7. COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS DE EMISIÓN DE LA LS EMANADA POR WIGGLERS MULTIPOLARES.

Cuando la K de un dispositivo de inserción alcanza valores superiores a 5 o 6, su emisión de luz es prácticamente blanca.

Sistemas de inserción que consiguen esto son los llamados “wigglers” cuyas características de espectro de emisión continuo, su alta intensidad, y la posibilidad de extender el rango de fotones útiles a energías superiores a las emitidas por los IC, los hace idóneos, por citar algunos ejemplos, para:

- a) Trabajos de espectroscopia de rayos X (p.e. EXAFS o NEXAFS), especialmente cuando altas energías fotónicas son requeridas (p.e. estudios químicos de catalizadores de petróleo);
- b) Aplicaciones médicas donde a menudo es necesario iluminar especímenes de gran tamaño con rayos X-duros, y;
- c) Aplicaciones de difracción con material en polvo conteniendo elementos pesados.

Se han considerado dos tipos de wigglers que, en principio al menos, podrían ser útiles en una instalación como la contemplada aquí.

A saber: un wiggler multipolar (MPW), construido con bloques magnéticos de imanes permanentes con $B_{MAX} = 1.78T$ y con 25 períodos de 8 cm (es decir $K=13.3$) y un wiggler superconductor (SCW) con $B_{MAX} = 2.165T$ y con 60 períodos de 3 cm (es decir $K=6.07$).

La ventaja del sistema superconductor es que se pueden conseguir campos magnéticos más elevados con períodos menores, es decir más pequeñas K , lo que extiende el rango de energías de fotones útiles.

La desventaja es que el espectro de emisión queda ligeramente estructurado.

Las energías críticas de estos dos sistemas de inserción son de 10653.3 eV y 12957.5 eV para el MPW y SCW, respectivamente.

La Fig. 5 muestra el brillo de la emisión de rayos X de estos wigglers si fueran instalados en una sección recta en ALBA (líneas negras), en la red DBA (líneas rojas) o en la red MBA (líneas azules). De nuevo, y por las mismas razones apuntadas arriba para el caso de la comparación entre los onduladores de vacío, el brillo de los wigglers en la red MBA no escala con la menor emitancia de esta red.

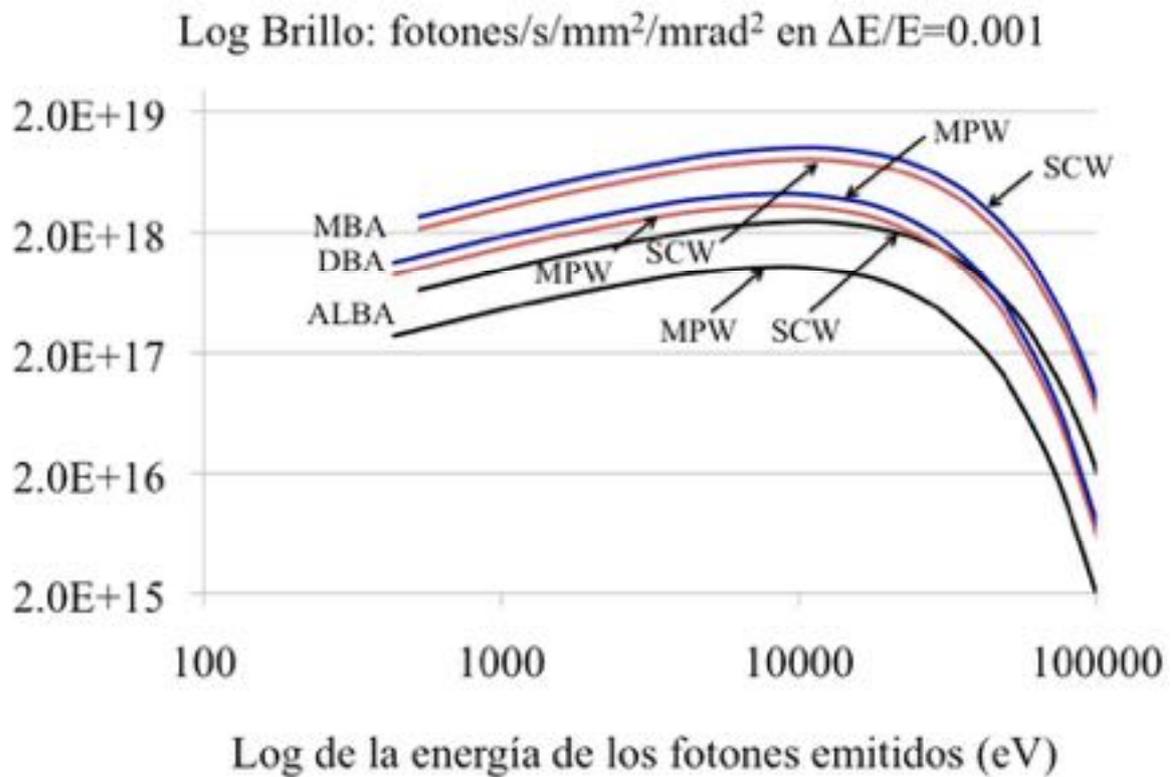


Fig. 5

La Fig. 6 muestra la variación del tamaño de la fuente luminosa en la dirección horizontal (σ_x en rojo) y en dirección vertical (σ_y en azul) para los primeros 50 m de la circunferencia de la red MBA, DBA y ALBA.

- Nótese, comparando las escalas verticales, que los tamaños del haz son significativamente menores en las redes MBA y DBA que en ALBA. Las posiciones de los IC, de las secciones rectas largas (SR-L), secciones rectas (SR) y secciones rectas cortas (SR-C) están indicadas.
- Nótese que es en los IC donde los tamaños horizontal y vertical de la fuente luminosa son más parecidos y con el área más pequeña. Esto confiere a estos puntos un buen potencial para líneas dedicadas a microscopia (p.e. aquellas usando lentes de Fresnel).

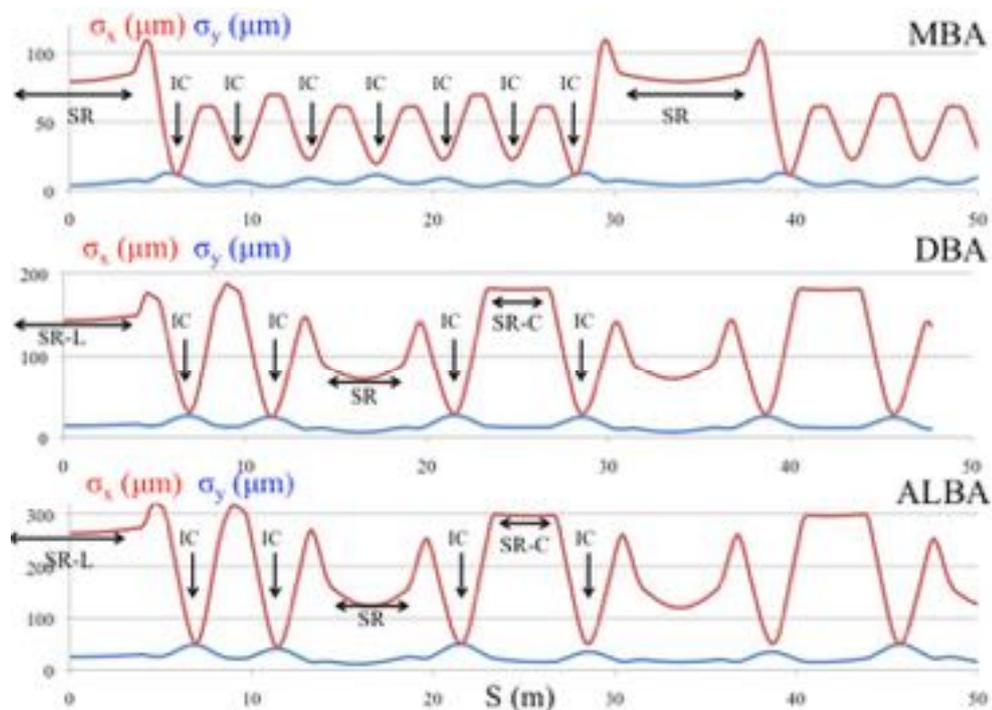


Fig. 6

Los datos mostrados en la Fig. 6 tienen una implicación importante para determinar los niveles de vibraciones que son tolerables. Con la suposición de un acoplamiento del 2%, el menor tamaño de la fuente luminosa en un punto de extracción de luz, con un valor de 4.4 μm , corresponde a la dirección vertical en una SR de la red MBA (véase la Tabla 1).

Como se ha comentado arriba, un acoplamiento del 2% es conservador y, en consecuencia, el tamaño que se puede conseguir con una buena ejecución de la red del AA probablemente sea inferior a estos 4.4 μm .

En cualquier caso, y dando este valor por bueno, si se debe mantener la fuente estable dentro de un 5% de este valor para evitar la generación de ruido en las medidas que inutilice la brillantez del AA, se concluye que el haz no puede moverse más de unos 220 nm.

Teniendo en cuenta que cualquier vibración puede ser amplificada unas 30 veces por la red de imanes, se deduce que vibraciones, en el rango de hasta 100 Hz o más (este rango queda definido por el tiempo mínimo de duración de una medida), con una amplitud superior a unos 7 nm no son aceptables.

Es evidente que esto impone un criterio muy estricto en la elección del terreno, en la ejecución de la losa crítica en el edificio, en la estabilidad térmica, y, también, en la estabilidad del suministro eléctrico. En cualquier caso, este nivel de estabilidad es probablemente inalcanzable solo con una buena ejecución del edificio y de los servicios en él incluidos y, consecuentemente, tanto para el AA como para las líneas de luz se tiene que contemplar desde un primer momento la necesidad de implantar un sistema global de feedback activo.

8. SISTEMAS DE INSERCIÓN A CONSIDERAR PARA EL USO POTENCIAL DETECTADO A DIA DE HOY.

La información facilitado por los promotores de la fuente de LS en México indica que inicialmente la instalación debería cubrir las siguientes aplicaciones experimentales:

1) *Photoelectron Diffraction (PhD)*

Ultraviolet Photoemission Spectroscopy (UPS)

Angular Resolved Ultraviolet Photoemission Spectroscopy (ARUPS)

2) *X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD)*

3) *X-Ray Photoemission Spectroscopy (XPS)*

Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA)

4) *Small-Angle X-ray Scattering (SAXS)*

5) *Crystallography of macromolecules.*

6) *X-ray Diffraction (XRD): Materials Science, Powder diffraction Inorganic materials*

7) *Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS)*

Near Edge EXAFS (NEXAFS)

X-ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Standing Waves (XSW)

8) *Medical applications*

Hay dos aspectos a destacar en este abanico de aplicaciones:

- i) han sido agrupadas de tal manera que, en principio al menos, se pueden desarrollar en una misma línea de luz (LL), y;
- ii) con la excepción de XMCD y aplicaciones médicas usando muy altas energías fotónicas todas estas técnicas pueden instalarse en un IC.

Como el brillo de la emisión de LS de un IC es muy inferior al de un sistema de inserción, es evidente que si se usa un IC o un sistema de inserción depende críticamente de las aplicaciones concretas en mente.

La Tabla 3 proporciona un punto de partida para definir los diversos tipos de sistemas de inserción que son contemplables en cualquiera de las redes aquí consideradas.

Si es sensato agrupar o no varias técnicas experimentales en una misma LL depende del número potencial de usuarios en cada una de las técnicas consideradas.

En consecuencia si se necesitan más LL es un tema a decidir en su momento por los gestores de la instalación. Todos los sistemas de inserción referidos en la Tabla 3 son técnicamente posibles, sin embargo los detalles precisos de diseño deben esperar a que

se haya tomado una decisión sobre la red del AA de almacenamiento y, también, a que se hayan refinado las propuestas de aplicaciones científicas.

| | ONDULADOR UV | ONDULADOR APPLE | ONDULADOR EN VACIO | MPW | SCW |
|---------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| GAP MINIMO (cm) = | 1.25 | 1.25 | 0.57 | 1.25 | 1.26 |
| BMAX, VERT (T) = | 0.6 | 0.89 | 0.8 | 1.78 | 2.165 |
| BMAX, HOR (T) = | - | 0.67 | - | - | - |
| BMAX, CIRC (T) = | - | 0.53 | - | - | - |
| KMAX, VERT = | 8.13 | 5.57 | 1.6 | 7.12 | 6.08 |
| KMAX, HOR = | - | 4.19 | - | - | - |
| KMAX, CIR = | - | 3.32 | - | - | - |
| PERIODO (cm) = | 14.5 | 6.7 | 2.2 | 4.3 | 3.00 |
| No DE PERIODOS = | 20 | 20 | 90 | 25 | 60 |
| LONGITUD (m) = | 3.00 | 1.75 | 2.1 | 1.2 | 1.9 |
| RANGO DE USO (eV) = | 9 - 600 | 60 - 1000 | 1000 - 18000 | UP TO 60000 | UP TO 100000 |
| APLICABLE A : | Espectroscopía UV; Fotoemisión; UPS, ARUPS o PHD | ESCA; XPS; PEEM XMCD | CRISTAL. MACROMOL.; SAXS Y NCD | EXAFS; NEXAFS XRF | APLICACIONES MEDICAS; DIFFRACCION MAT. INORG. |

Tabla 3

En resumen, en estos momentos la información incluida en la Tabla 3 debe simplemente tomarse como un punto de partida.

Nótese que la longitud del sistema de inserción apuntada en la tabla 3 corresponde a una estimación de la longitud física del dispositivo. Obviamente, en todos los casos la longitud magnética (es decir, el número de periodos multiplicado por la longitud de un periodo) es inferior a la física.

Para la estimación de costes de las LL (véase Tabla 5, en el Capítulo 11) se ha supuesto que el número inicial de ellas es ocho.

9. CRITERIOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

En la definición de la pared de protección radiológica se ha supuesto que el objetivo es que la máxima irradiación permitida por encima de la medioambiental es 1 mSv/año (1 mili-Sievert/año). Esta es una dosis muy conservadora que puede excederse de forma natural en, por ejemplo, una zona con emisiones de radón. Esta dosis se considera totalmente inocua y es aplicable al público en general.

Desconocemos cual es la normativa en México pero en la definición de la pared de protección radiológica se ha supuesto que la legislación aplicable es la misma que la Europea o la Norteamericana (¡altamente restrictiva!).

La pared de protección radiológica debe tener más grosor en las zonas con posibles pérdidas del haz, es decir las zonas de inyección, y, preferiblemente el hormigón debe ser baritado al menos en las zonas de inyección.

En cualquier caso, enclavamientos con detectores de rayos gamma y de neutrones deben distribuirse periódicamente en el hall experimental siguiendo el perímetro del AA. Estos enclavamientos deberán estar conectados al sistema de radio frecuencia para poder deshabilitar el haz en el caso de detección de niveles inaceptables de radiación (algo improbable).

Si la legislación demandara que se aplique el criterio de redundancia y diversidad, entonces se sugiere que los enclavamientos también estén conectados a un armario de suministro de potencia a un electroimán.

En ambos casos, si el sistema es activado el haz se perderá uniformemente alrededor del AA sin causar mayores problemas.

Naturalmente, el sistema de protección radiológica tiene que contener un sistema de "interlocks" e inspección para evitar que ningún individuo, accidental o intencionalmente, pueda quedarse dentro de un recinto de aceleradores o de una línea de luz cuando el haz pueda entrar en funcionamiento.

10. ESTUDIO DE DISTRIBUCIÓN DE VOLÚMENES

10.1. TÚNEL

El desarrollo del laboratorio de Luz Sincrotrón nace del Túnel circular donde se alojan el anillo propulsor (Booster) y el anillo de almacenamiento (AA), unidos a través de la Inyección. Del AA parten las Líneas de Luz (LL) las cuales definen la caprichosa geometría del muro exterior del Túnel, en forma de diente de sierra. Este muro tiene una doble función, por un lado define las salidas de las LL desde los Imanes de Curvatura (IC) y desde los dispositivos de inserción, y por otro, como se ha definido en el punto anterior proporciona la protección radiológica necesaria.

Ambos requerimientos lo definen geoméricamente. La protección radiológica se obtiene a través del binomio espesor-densidad del material. La densidad del material, concreto reforzado, se consigue a través del empleo de árido de elevado peso específico. El árido normalmente empleado es la barita, como fue el caso de Alba. Obteniéndose de este modo muros de espesor variable entre 1 y 1,65 m, este último en las zonas de mayor radiación, señaladas en el punto anterior.

El muro interior del túnel sigue el desarrollo circular de los anillos. A él se incorporan el Linac, que se describe más adelante, y los accesos de personal y servicios del Túnel, a través de laberintos como sistema de protección. En cuanto al techo del túnel, debe ser totalmente desmontable, puesto que de esta forma se simplifica la instalación inicial de todos los subsistemas de los aceleradores ya premontados y alineados en el exterior y para facilitar futuras manipulaciones de los componentes y mejorar de este modo la explotación. Para ello debe prefabricarse y disponer de elementos de enganche. No obstante no deben menoscabarse sus propiedades protectoras, lo cual se consigue a través de un estudiado diseño de espesores y juntas discontinuas.

10.2. ÁREA EXPERIMENTAL

Se trata de la corona situada alrededor el Túnel donde se distribuyen las LL que surgen del AA. A partir de las cuales se instalan las cabinas para sistemas ópticos y los experimentos (Hutches). En este estudio se prolongan además varias las líneas de gran longitud (150 m), 3 y 5 respectivamente en los modelos MBA y DBA.

El Área Experimental junto con el Túnel y el Linac, son los espacios del edificio donde los requerimientos de estabilidad son máximos. La estabilidad mecánica y el aislamiento de las vibraciones exteriores se consiguen por medio de un sistema de cimentación denominado Losa Crítica. Este posee un diseño adaptado a las características particulares del terreno en el que se asienta, así como un proceso constructivo muy exigente con unas tolerancias mínimas, para conseguir el máximo monolitismo y planeidad.

10.3. LINAC

El bunker destinado a albergar el LINAC se ha puesto pegado contra la pared interior de protección radiológica del AA (Véase plano 06-DETALLE).

El ángulo de incidencia al Acelerador Propulsor (AP) se ha mantenido lo más rasante posible. Con esta configuración se consigue un bunker con una longitud útil de 30 m. Esta longitud es suficiente para albergar un LINAC (con una configuración conceptual como se presenta en la Fig. 7) con un haz de salida de al menos 150 MeV.

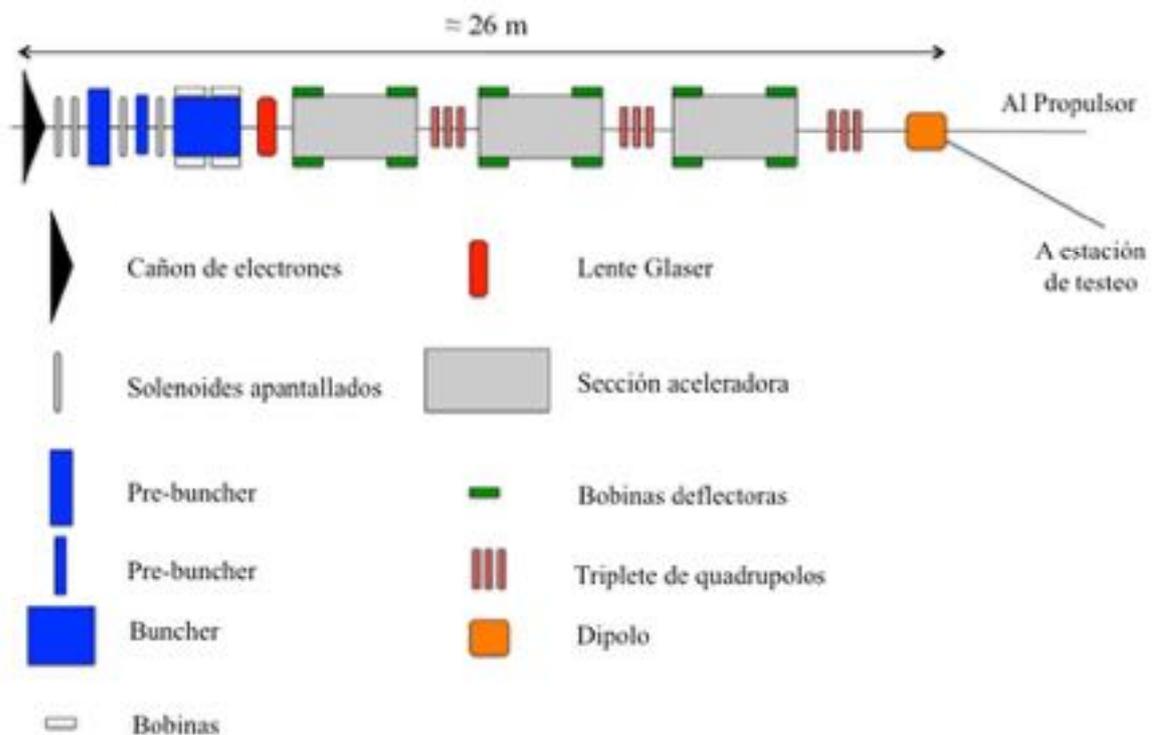


Fig. 7

150 MeV es una energía razonablemente cómoda para inyectar al AP, pero si se deseara, el LINAC podría extenderse añadiendo otra sección aceleradora para alcanzar una energía de salida de al menos 200 MeV. Pero para ello sería necesario aumentar la longitud del bunker lo que aumentaría el ángulo de incidencia.

10.4. ÁREA DE SERVICIO

Adosada a la cara interior del Túnel se desarrolla éste área que alberga los componentes auxiliares de los subsistemas de los aceleradores, entre ellos los sistemas de control, estabilización y radiofrecuencia. El acceso a esta zona, separada del resto del edificio por el Túnel, se realiza a través de una pasarela aérea o a través de una galería subterránea que se describe más adelante.

Área de Servicio, Área Experimental, Túnel y Linac constituyen el volumen central del edificio, con la característica forma de corona circular. Todo este ámbito es abarcado por

una grúa orbital que facilita la introducción y recambio de los subsistemas de los aceleradores desde la parte superior, así como el desplazamiento de las piezas del techo del Túnel y los equipos propios de la explotación de la instalación. En cada una de las LL de gran longitud deben emplearse sistemas lineales específicos de manipulación de cargas.

La altura del Túnel (interior 3 m) más las dimensiones necesarias para el correcto funcionamiento de la grúa sobre el mismo, definen la altura del Edificio Principal.

10.5. LABORATORIOS DE APOYO

Entorno al Área Experimental se distribuyen los Laboratorios de Apoyo requeridos durante los trabajos de investigación propios de la explotación.

10.6. SERVICIOS GENERALES

Bajo este nombre se agrupan el resto de espacios necesarios para el buen funcionamiento del programa del edificio principal: recepción, restaurante, auditorio, oficinas, sala de control, salas de reuniones, vestuarios, circulaciones, etc...

10.7. ESPACIOS TÉCNICOS

Todo el conjunto no funcionaría sin una fuente de energía eléctrica y una producción de climatización para las diferentes áreas, que en la zona crítica deben ser además de máxima estabilidad, como se ha descrito anteriormente. El conjunto de estos volúmenes los hemos denominado Espacios Técnicos.

Completamente separado del Edificio Principal, para evitar transmisión de vibraciones así como para adaptarse al terreno que finalmente se elija, pero lo más próximo posible para economizar recorridos, se prevé el Edificio Técnico. Se divide en tres zonas. Eléctrica, en la que se encuentran el subsistema de regulación eléctrica, las plantas de emergencia, los Sais dinámicos y estáticos, conmutación y tableros principales. Zona de producción térmica: Chillers, calderas, bombas, un doble circuito de agua normal y agua desmineralizada, para climatización y refrigeración de equipos y nitrógeno líquido. Y zona de depósitos de acumulación de agua, salmuera, combustibles, etc... Además en este edificio se prevé la necesidad de un taller de mantenimiento general del complejo, próximo al edificio principal.

A través de una galería subterránea se conducen estos servicios hasta el edificio principal, más concretamente al Área de Servicio, donde se prevé repartirlas por una galería circular y por una prolongación hasta la Sala de Control. Además, la galería, cumple la función de ruta de evacuación desde el centro del anillo.

Entorno al Área Experimental, se distribuyen los climatizadores que tratan el aire de la zona crítica de forma estratificada para garantizar la estabilidad requerida.

10.8. CONSTRUCCIONES COMPLEMENTARIAS

El complejo del Laboratorio de Luz de Sincrotrón se completa con construcciones adicionales, independientes del Edificio Principal y el Técnico, pero no por ello prescindibles, pues el programa constructivo debe dar respuesta a todas las necesidades del complejo. Edificio de seguridad para el control de acceso de personal y mercancías. Zona de circulación de los vehículos pesados que transportan los componentes tanto del Área Experimental como de las propias instalaciones del edificio y los suministros necesarios. Edificio de almacenamiento de componentes y suministros, previo a su uso. Zona de estacionamiento de vehículos del personal.

10.9. DESCOMPUESTO SUPERFICIES (APROXIMADO PARA ESTA PROPUESTA DE FUENTE DE LUZ)

Basado en las premisas y definiciones anteriores y, con relación a la documentación gráfica que acompaña el presente informe, se propone el siguiente cuadro de superficies que debiera ser considerado para la definición del edificio.

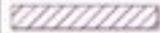
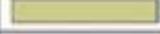
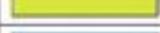
| | | |
|---|--------------------------|-----------------------------|
| 01 - PLANTA SÓTANO | | 2.630 m² |
|  | GALERÍA TÉCNICA | 1.680 m ² |
|  | DEPÓSITOS ENTERRADOS | 950 m ² |
| 02 - PLANTA 0 | | 36.940 m² |
|  | TÚNEL ACELERADOR Y LINAC | 3.700 m ² |
|  | ÁREA EXPERIMENTAL | 11.060 m ² |
|  | ÁREA DE SERVICIOS | 5.040 m ² |
|  | LABORATORIOS | 5.540 m ² |
|  | ÁREA TÉCNICA | 3.020 m ² |
|  | SERVICIOS GENERALES | 2.300 m ² |
|  | EDIFICIO TÉCNICO | 6.280 m ² |
| 03 - PLANTA 1 | | 10.222 m² |
|  | LABORATORIOS | 780 m ² |
|  | ÁREA TÉCNICA | 2.042 m ² |
|  | SERVICIOS GENERALES | 4.400 m ² |
|  | PASARELAS COMUNICACIÓN | 3.000 m ² |
| 04 - PLANTA 2 | | 2.300 m² |
|  | SERVICIOS GENERALES | 2.300 m ² |
| TOTAL SUPERFICIES | | 52.092 m² |

Tabla 4

11. ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LOS COSTE DE INVERSIÓN

Se basa, la presente estimación en las Redes de Aceleradores que han sido consideradas en el presente informe, con la premisa de montaje de 8 líneas de luz usando dispositivos de inserción y, de acuerdo, a los layouts presentados

| ESTIMACION DE COSTES DE INVERSION (k€), IMPUESTOS EXCLUIDOS; DURACION 6 AÑOS (i) | |
|---|----------------|
| 1. INVERSIONES | |
| TERRENOS (ii) | - |
| COMPLEJO ACELERADORES | 67.500 |
| LINEAS DE LUZ | 64.000 |
| EDIFICIOS Y SERVICIOS TECNICOS | 179.000 |
| COMPUTACION, CONTROLES Y ADQUISICION DE DATOS | 16.000 |
| LABORATORIOS | 5.000 |
| OTRAS INVERSIONES | 3.500 |
| INFRAESTRUCTURA ELECTRICA (iii) | - |
| 2. COSTES DE FUNCIONAMIENTO | 23.000 |
| 3. IMPUESTOS (iv) | - |
| 4. GASTOS DE PERSONAL (v) | 38.400 |
| TOTAL | 396.400 |

SUPOSICIONES:

(i) EL DISEÑO DETALLADO DE LA INSTALACION HA SIDO PREVIAMENTE LLEVADO A CABO

(ii) HAN SIDO CEDIDOS LIBRES DE COSTE

(iii) SE DISPONE DE UNA SUB-ESTACION ELECTRICA CERCANA, CON UN TRANSFORMADOR Y BARRA DE POTENCIA DE VOLTAJE MEDIO DEDICADOS A LA INSTALACION

MEDIO DEDICADOS A LA INSTALACION

(iv) SE SUPONE LIBRE DE CARGAS, INCLUIDAS LAS PERTINENTES A LA SEGURIDAD RADIOLOGICA

(v) SE ESTIMA UN TOTAL DE 640 AÑOS DE TRABAJO (60 k€/PERSONA/AÑO)

Tabla 5

12. UNA OPCIÓN ALTERNATIVA A LA RED MBA: RED 9BA

Las redes DBA y MBA presentadas arriba son ejecutables en la práctica con un riesgo relativamente bajo.

Por otro lado se pueden considerar redes con un riesgo de ejecución más alto. Este es el caso de una red acromática cuyas características han sido proporcionadas por los promotores del proyecto mejicano.

Cada celda de esta red, que contiene 9 IC con gradiente, tiene una longitud de 17 m y deja una SR de unos 5 m entre celdas.

Para que las dimensiones del AA sean aproximadamente las mismas que en los casos considerados arriba, planteamos un total de 24 celdas. Es decir un perímetro de 408 m que es comparable al de la red DBA (405.9 m) y al de la red MBA (404.8 m).

A partir de ahora denominaremos 9BA (*nine-bend-achromat*) a esta red.

La deflexión angular entre SR en la red 9BA es de 15° , es decir idéntica al de la red DBA. Consecuentemente, la geometría del hall experimental sería muy similar y permitiría la instalación de 5 LL largas.

La red 9BA no adolece de la baja eficiencia de explotación de la red MBA puesto que desde su perímetro de 408 m se pueden utilizar un total de 22 SR para dispositivos de inserción.

Una de las dos SR restantes debe ser utilizada para albergar las cavidades de RF y otra para instalar los dispositivos de inyección. Es evidente que la eficiencia de uso de la red 9BA (22 SR útiles en 408m) compara muy favorablemente con la red MBA (10 SR útiles en 404.8 m) y es casi idéntica al de la red DBA (23 SR útiles en 405.9 m).

Por otro lado la emitancia teórica de la red 9BA es de 0.103 nm rad. Esto la hace altamente competitiva con respecto a la emitancia teórica de la red DBA (1.317 nm rad) y de la red MBA (0.43 nm rad).

| | 9BA | DBA | MBA |
|--------------------------|-------|--------|-------|
| Emitancia (nm rad) | 0.103 | 1.317 | 0.430 |
| Perimetro (m) | 408.0 | 405.9 | 404.8 |
| N_{IC} | 216.0 | 48.0 | 84.0 |
| N_{IC} útiles | 24 | 24 | 24 |
| SR-L | - | 4 | - |
| SR-L útiles | - | 3 | - |
| SR | 24 | 20 | 12 |
| SR útiles | 22 | 20 | 10 |
| β_x (m) IC | 0.821 | 0.407 | 0.726 |
| β_y (m) IC | 2.611 | 21.933 | 9.952 |
| σ_x (μ m) IC | 14.0 | 26.9 | 23.0 |
| σ_y (μ m) IC | 2.3 | 23.8 | 9.2 |
| β_x (m) SR | 3.974 | 1.991 | 5.175 |
| β_y (m) SR | 3.625 | 1.465 | 2.278 |
| σ_x (μ m) SR | 20.0 | 70.8 | 79.3 |
| σ_y (μ m) SR | 2.7 | 6.2 | 4.4 |

Tabla 6

Cuando se consideran todos estos aspectos se llega a las comparaciones presentadas en la Tabla 5 y en las Fig. 8, 9 y 10 que describen los brillos respectivos de la redes DBA, MBA y 9BA emanados por los IC (Fig. 8), desde un ondulator de vacío (Fig. 9) y para un

MPW y un SCW (Fig. 10). Las características de estos dispositivos de inserción son idénticas a las usadas para los cálculos presentados en las Figs. 3, 4 y 5.

La Tabla 5 compara los principales parámetros de las diversas opciones y las características del haz de fotones en los puntos de probable extracción de luz, es decir en el centro de las SR y en el IC del centro de la celda.

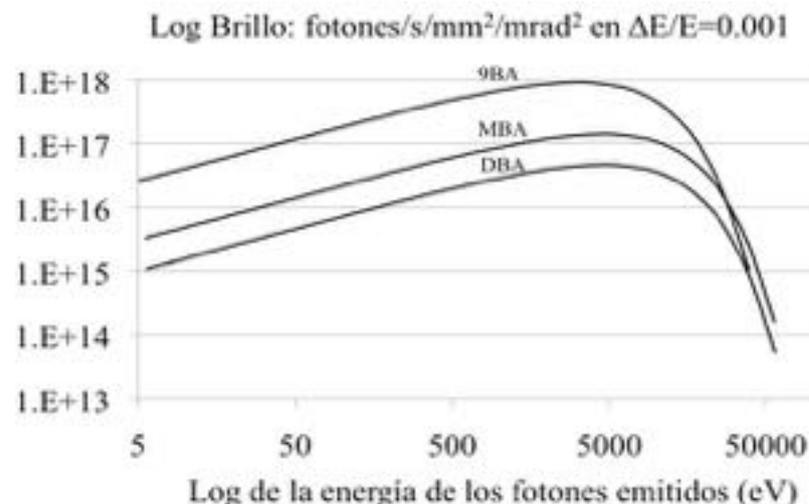


Fig. 8

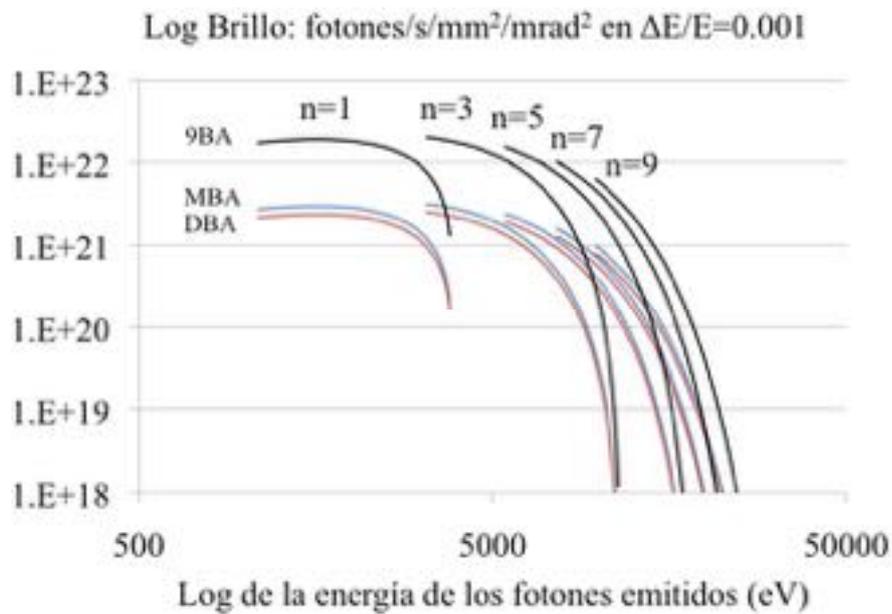


Fig. 9

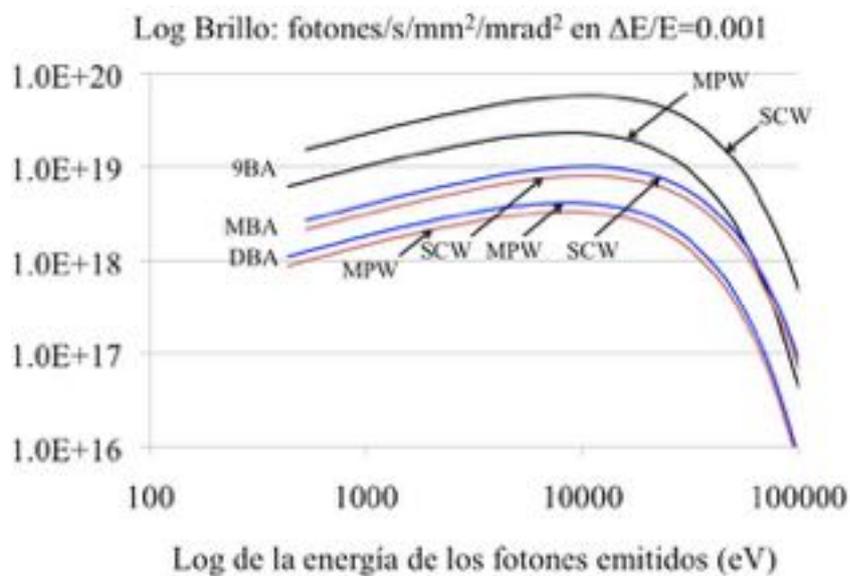


Fig. 10

Los datos presentados en la Tabla 5 y en las Figs. 8, 9 y 10 son contundentes con respecto a la superioridad de la red 9BA en relación a la de las otras arriba consideradas. Sin embargo, antes de tomar la decisión de implementar este diseño se deberán tener en cuenta posibles riesgos en su ejecución práctica.

A saber:

- La cromaticidad de la red es elevada y para corregirla es necesario interponer sextupolos coexistiendo con cuadrupolos en la misma posición. Esto es técnicamente complejo.
- Incluso sin considerar errores en la posición y comportamiento de los elementos ópticos la apertura dinámica es baja (del orden de 1-2 mm). La presencia de inevitables errores empeorará la situación.
- La densidad de elementos ópticos es muy elevada. Por ejemplo, hay puntos en las que el espacio disponible para instalar sextupolos con gradientes excepcionalmente altos ($K=224.84$) es muy reducido con un margen de error de solamente unos 4 cm.
- Los IC son cinco familias con distintos gradientes. Esto implica una ejecución casi artesanal, probablemente con costes muy elevados (que no se han podido cotejar en la práctica!).

La longitud idónea de una SR para acomodar la inyección a 3 GeV y con opción de “top up” es del orden de unos 7-8 m.

Las SR en esta red son 5 m como máximo (suponemos que “ramping” en el AA no es una opción deseable ya que preclude el funcionamiento en “top-up”). Dado el espacio disponible en las SR, la inyección tendrá que hacerse con “kicks” elevados. Esto entra en conflicto con la baja apertura dinámica de la red.

Finalmente, hay una probabilidad no despreciable que la instalación de dispositivos de inserción con un alto K (p.e. un MPW) afecte negativamente el funcionamiento de la instalación.

A todos estos puntos hay que añadir la complejidad de las cámaras y del sistema de vacío derivada de la falta de espacio debida a la congestión en las celdas.

No se ha dispuesto de tiempo suficiente para evaluar estos temas de una manera exhaustiva.

En consecuencia, se recomienda que si los promotores de la fuente de LS mexicana deciden implementar la red 9BA se debería convocar un “workshop” con expertos para evaluar en detalle los riesgos a incurrir en su ejecución. Esto podría ser el punto central de debate en una primera reunión de la Comisión Asesora de Aceleradores (Comisión normalmente llamada MAC o “Machine Advisory Committee”).

13. IMPLANTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SINCROTRÓN MEXICANO EN TERRENO IDEAL

Se entiende como terreno ideal, aquel que estaría cumpliendo con los mejores requisitos posibles para la ubicación de la Fuente de Luz de Sincrotrón, atendiendo a sus necesidades de superficie, características del terreno que den la mayor estabilidad mecánica a las áreas críticas, alimentación eléctrica suficiente para operar el edificio y, en la medida de lo posible, alejado de fuentes de vibración cuyo periodo afecte al haz de luz.

Estos puntos, críticos por todo lo anteriormente expuesto en el presente informe, deben converger, además, con la posibilidad de no pensar únicamente en un terreno capaz de albergar la fuente de luz, si no también bajo el concepto de creación de Complejo Tecnológico en el que, a futuro, incluir otras facilities de alta tecnología que permitan vincularse con el sincrotrón o, cuyas características y necesidades de estabilidad, se asemejen lo bastante como para pensar en una implantación conjunta y creación, a futuro, de un polo tecnológico en el Estado.

El terreno ideal, debería considerar los siguientes requisitos:

- Geológicamente muy estable
- Libre de movimientos diferenciales
- Composición con baja propagación de vibraciones
- Capa freática profunda
- Alejado de
 - o fuentes de ruido vibracional, por ejemplo fábricas con actividades industriales pesadas, molturadoras, etc.;
 - o carreteras con tráfico pesado y de líneas de ferrocarril;
- Territorio urbanizado con accesos
- Suministro abundante de agua
- Suministro eléctrico con redundancia: al menos, uno de los suministros debe ser de alta calidad, procedente de una subestación eléctrica cercana con transformador y barra de voltaje medio dedicados a la instalación [estimados 15MW]
- En zona con vías de comunicación, preferentemente internacionales: autopista, tren y aeropuerto
- Alojamiento disponible para varios cientos de usuarios a una distancia accesible andando.

- En el caso que se acaben construyendo en un inicio 8 líneas de luz, se estima necesario alojar, al menos a 80 usuarios (desde el día de inicio de la explotación)
- Preferiblemente en un entorno académico relevante con institutos o departamentos dedicados a la investigación en
 - Ciencia de Materiales
 - Biología
 - Medicina
 - Química
 - etc.

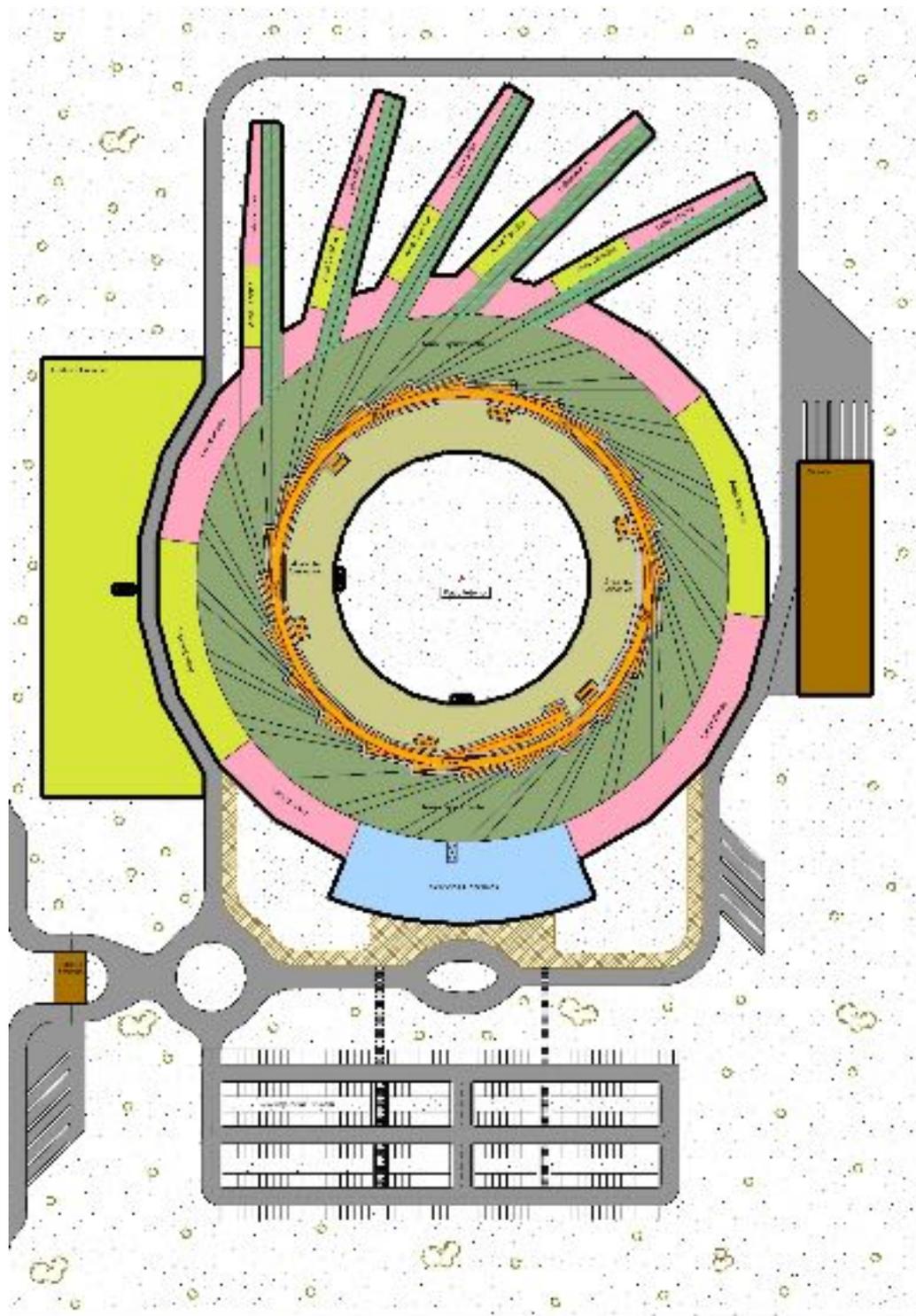
Esto, debe fomentar las sinergias de investigación típicas y características a través del arranque de una fuente de luz de sincrotrón. En el caso que no exista la posibilidad de integrar la instalación de LS en un terreno académico ya consolidado, debería considerarse un terreno mucho mayor para las futuras implantaciones.

Hemos estimado, la necesidad de un terreno con una superficie aproximada de 140.000 m², que permitiría la inserción de la fuente de luz de sincrotrón, a través de su edificio principal y edificios anexos requeridos de acuerdo a lo anteriormente expuesto.

El terreno mínimo, para la creación de un polo tecnológico que orbite a través de una Fuente de Luz de Sincrotrón, además de cumplir con los anteriores requisitos, debería tener una superficie de 300.000 m² y alimentación eléctrica de, no menos, de 50MW, con posibilidad de ampliar a medida se vayan definiendo, creando e instalando las futuras facilities (tipo, por ejemplo, un X-FEL o centros asociados a investigación con neutrones o física de partículas).

Resaltar que, todo lo anterior, se engloba en el término “*ideal*”. Las particularidades anteriormente indicadas sobre la idoneidad del terreno, serán claves en la definición del valor inversional adelantado, minimizando el impacto de adecuación de terreno o aportación de energías y consumos requeridos para la operación de la facility.

13.1. IMPLANTACIÓN IDEAL



REPRESENTACIÓN DE UN TERRONO TEORICO PARA UBICAR EL PROGRAMA CONSTRUCTIVO COMPLETO
Superficie 140.000 m²

Fig.11

14. PLANOS

Se adjuntan al Informe Inicial de un Estudio de Implantación de una Instalación de Luz de Sincrotrón una serie de planos que representan lo descrito en el mismo a nivel de edificaciones que envuelven y protegen el equipamiento científico, y a su vez lo dotan de todos los servicios e instalaciones necesarios para su adecuada explotación.

Dado que las 2 propuestas estudiadas en profundidad DBA y MBA se han considerado con anillos de aceleradores del mismo radio para facilitar su comparación, el programa de construcciones es similar en ambos casos. Se presentan los planos correspondientes a la propuesta DBA. Los planos adjuntos son los siguientes:

- 01.- Planta sótano
- 02.- Planta 0
- 03.- Planta 1
- 04.- Planta 2
- 05.- Secciones
- 06.- Detalle Hall Experimental
- 07.- Implantación



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Informe Preliminar Sobre la Idoneidad de los Terrenos Propuestos por el Estado de Morelos Para la Implantación de la Futura Fuente de Luz de Sincrotrón Mexicana

Técnicas Reunidas
Master. Ingeniería Arquitectura

En Ciudad de México, 21 de Marzo de 2016

INFORME PRELIMINAR SOBRE LA IDONEIDAD DE LOS TERRENOS PROPUESTOS POR EL ESTADO DE MORELOS PARA LA IMPLANTACION DE LA FUTURA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRON MEXICANA

Para la realización de este informe se han recibido de parte de C.E.R.T los datos sobre 4 terrenos ubicados en el Estado de Morelos:

- A) El Llano, Fracción A, Localidad: Miacatlan
- B) El Llano, Fracción B, Localidad: Miacatlan
- C) Barrio San Fernando, Mariano Matamoros, Localidad: Ayala
- D) Colina Emiliano Zapata, Localidad: Tlaquiltenango

Cabe señalar en primer lugar que para un análisis técnico de la idoneidad de un terreno sobre su uso edificatorio se requiere una serie de información previa, datos que comprenden fundamentalmente las dimensiones geométricas, la topografía, el estudio de suelos y la disponibilidad de los servicios públicos necesarios, que en el caso de la energía eléctrica es un condicionante básico en este proyecto. Se recomienda, considerar una alimentación eléctrica, con redundancia para un consumo previsto de 12MW.

Se presupone, por otra parte, que todos los terrenos propuestos cumplen la normativa urbanística local para el uso previsto. En caso contrario este aspecto debería considerarse de forma específica, pues puede ser por sí sólo determinante de la idoneidad del terreno para el proyecto.

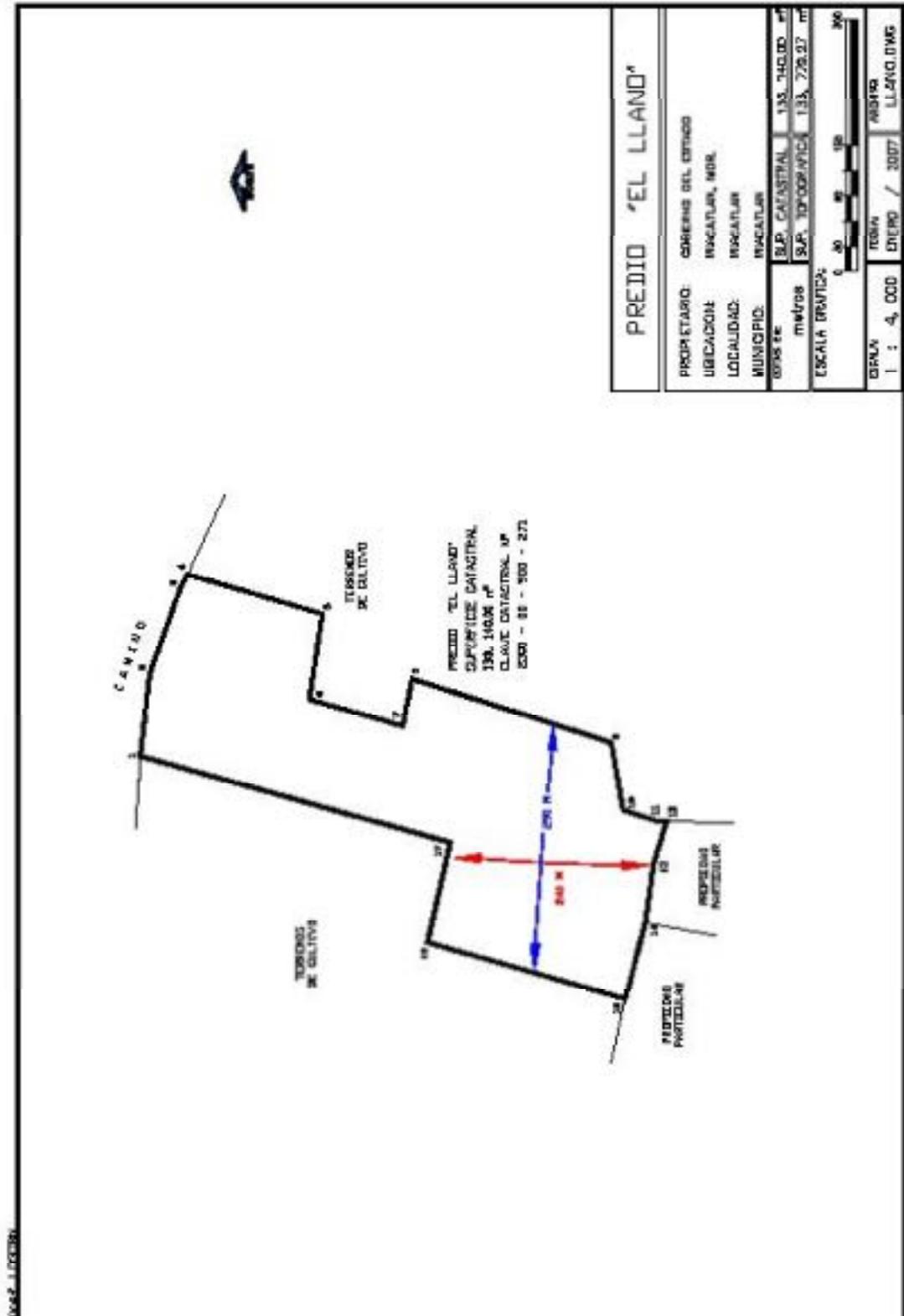
En este momento no se dispone de información geotécnica ni específica sobre los servicios públicos de ninguno de los terrenos. Sólo se tiene información topográfica de dos de los mismos. Por tanto este informe no puede más que limitarse a datos recibidos. En caso de completarse la información se procedería a su análisis.

Se ha hecho una primera estimación de la superficie necesaria para el desarrollo completo del programa edificatorio del proyecto, alcanzándose la cifra aproximada de 140.000 m² de terreno, según se representa en el plano 7 – Implantación, del Informe.

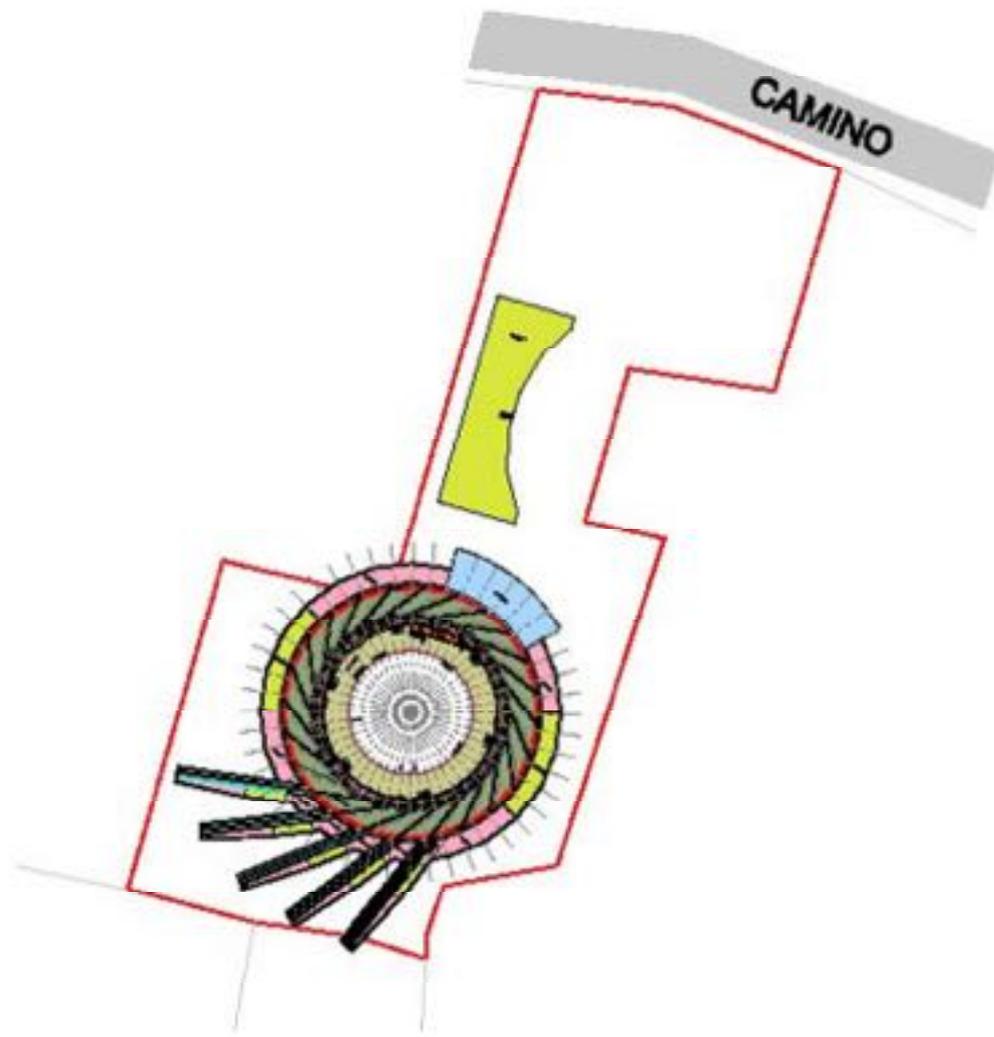
Corresponde a una implantación teórica o ideal, sin estar condicionada a las características de los terrenos reales. En la que se representa el desarrollo completo del programa, que comprende el Edificio Principal, el Edificio Técnico y las construcciones complementarias: accesos, vías de comunicación interna, almacén, aparcamiento, etc..., así como la posibilidad de ciertas ampliaciones o nuevas construcciones auxiliares futuras.

Se trata por tanto de una primera aproximación orientativa, susceptible de variar dependiendo de la forma del terreno, altimetría, soluciones constructivas, superposición de volúmenes, normativa urbanística, etc...

1.1. EL LLANO, FRACCIÓN A, LOCALIDAD: MIACATLAN



PLANO DEL TERRENO
 INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



EL LLANO (FRACCIÓN A)
LOCALIDAD: MIACATLAN
SUP. 133,140 m² - INSUFICIENTE

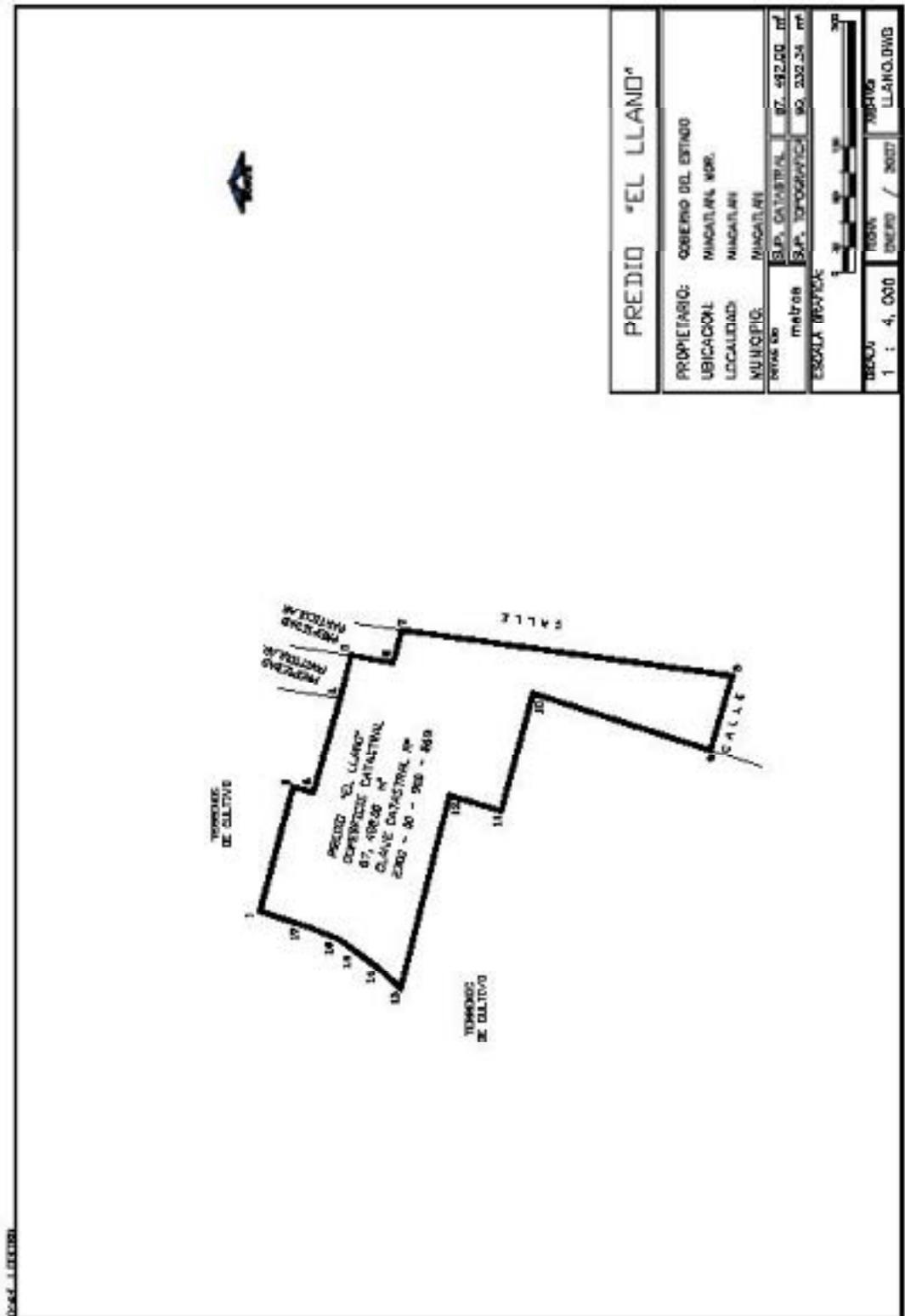
ESTUDIO DE IDONEIDAD DEL TERRENO

Fig.1

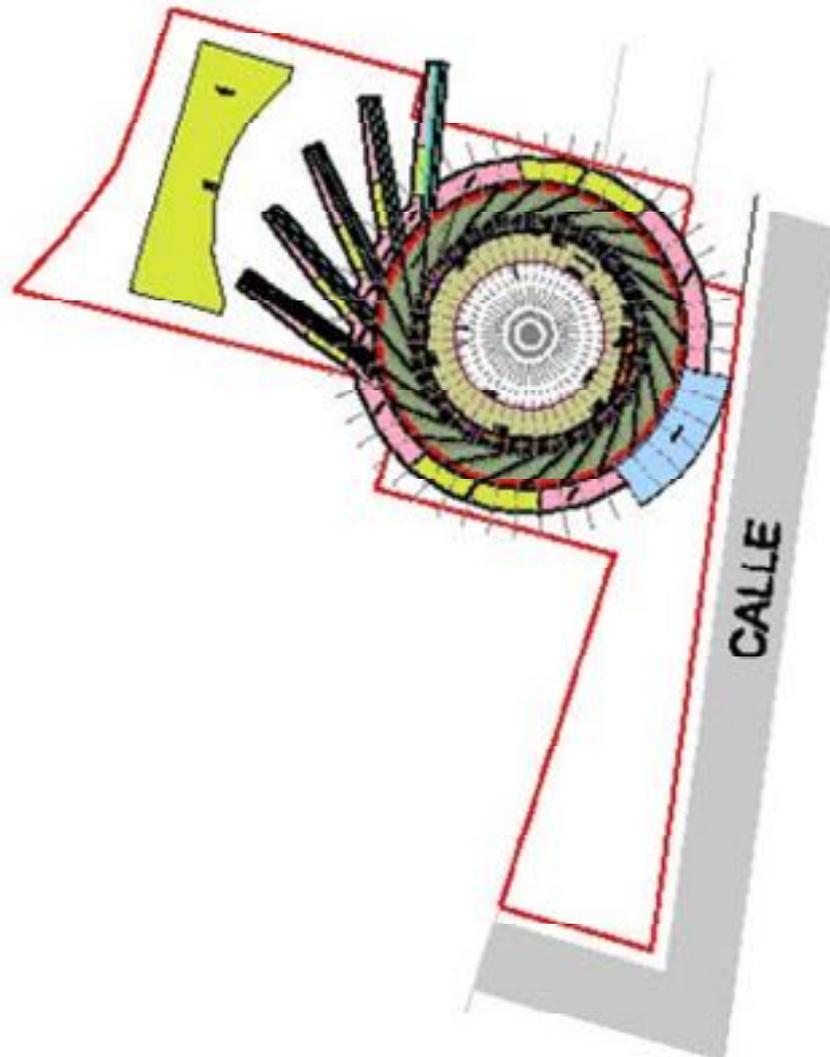
El Llano, Fracción A, Localidad: Miacatlan

Sólo se dispone de la información planimétrica adjunta. Al intentar implantar el Edificio Principal y el Técnico (ver Fig. 1) se aprecia claramente que posee un tamaño insuficiente para el desarrollo completo del edificio, ni que decir tiene el resto de construcciones complementarias tampoco se implantaría de una forma ideal, quedarían fuertemente condicionadas. La insuficiencia, no sólo se debe a la propia magnitud de la superficie, sino también a su forma irregular poco adaptada al tamaño del Edificio Principal, la que exigiría separar más de lo conveniente el resto de las edificaciones, lo que además lo poco eficaz en carecería el proyecto.

1.2. EL LLANO, FRACCIÓN B, LOCALIDAD: MIACATLAN



PLANO DEL TERRENO
 INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



EL LLANO (FRACCIÓN B)
LOCALIDAD: MIACATLAN
SUP. 87,492 m² - INSUFICIENTE

ESTUDIO DE IDONEIDAD DEL TERRENO

Fig.2

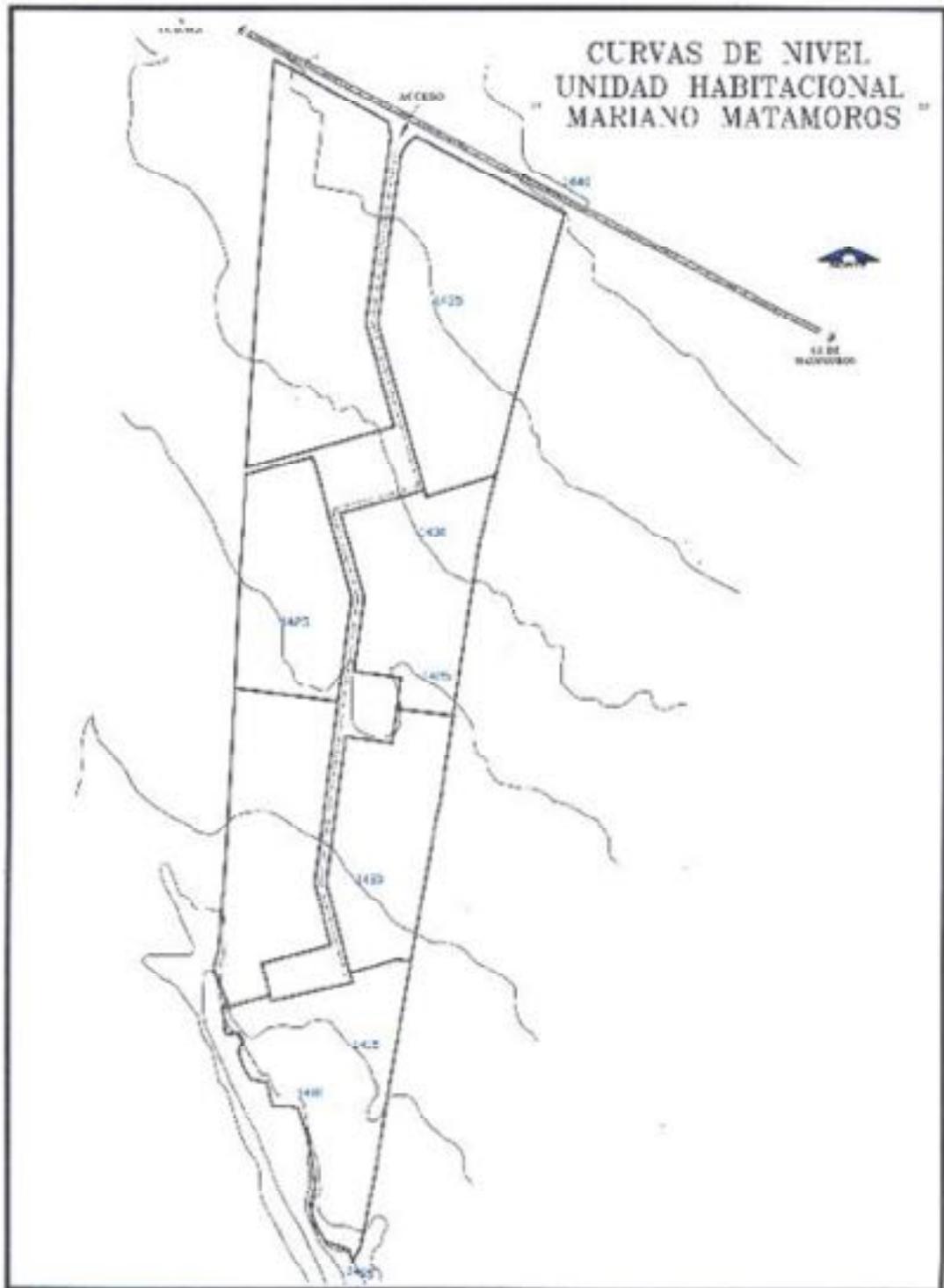
El Llano, Fracción B, Localidad: Miacatlan

Sólo se dispone de la información planimétrica adjunta. Es un terreno de superficie insuficiente para la implantación del proyecto en el mismo, según Fig. 2, muy alejado de la ideal expuesta anteriormente (140.000 m²).

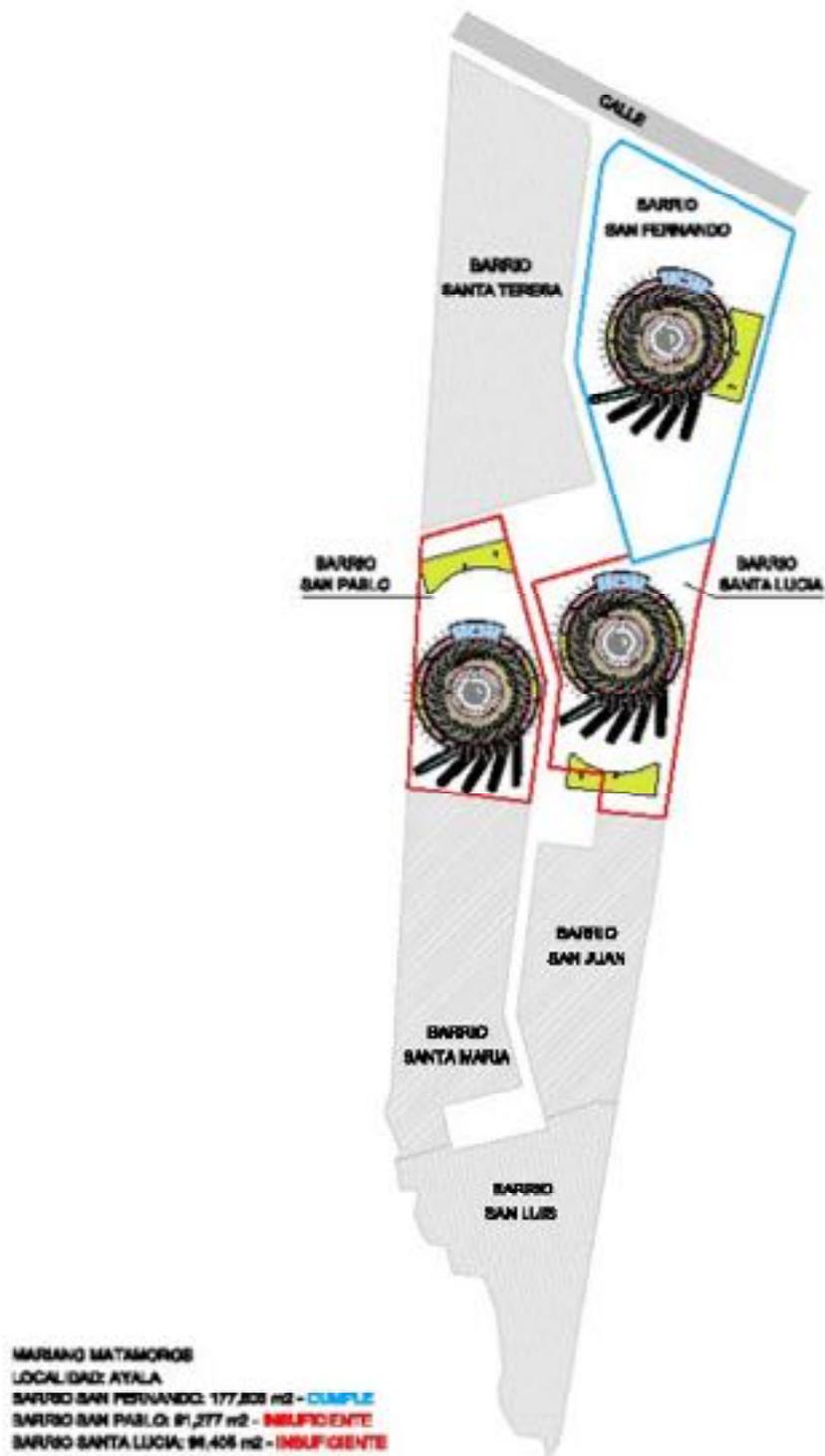
1.3. BARRIO SAN FERNANDO, MARIANO MATAMOROS,
LOCALIDAD: AYALA



PLANO DEL TERRENO
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



CURVAS DEL TERRENO
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



ESTUDIO DE IDONEIDAD DEL TERRENO

Fig. 3

Mariano Matamoros, Localidad: Ayala.

Ubicado en la Villa de Ayala, Estado de Morelos, se encuentra a 8,6 km del núcleo urbano de Jantetelco, el terreno se denomina Unidad Habitacional Mariano Matamoros.

Se dispone del plano del terreno con cuadro de áreas identificadas como 7 barrios, y de plano topográfico con las curvas de nivel. Así mismo se ha informado de que el suministro eléctrico se realizaría desde la Planta Termoeléctrica de Huexca, situada a 7 km.

El área total del terreno es de 47 Has, pero a partir del plano del terreno, se puede establecer que 4 de los 7 barrios ya están urbanizados y ocupados por viviendas, por lo que quedan disponibles los otros 3. Como se aprecia en el Fig. 3, existen 2 de ellos: Barrio San Pablo y Barrio Santa Lucia, que son demasiado pequeños, por lo que resultan insuficientes para albergar el proyecto.

Por el contrario Barrio San Fernando dispone de una superficie suficiente (177.803,60 m²), por encima del teórico previsto (140.000 m²). Lo que permitiría desarrollar todo el programa y además disponer de un pequeño margen de cara a futuras ampliaciones.

Por otro lado es una ventaja añadida que existan otros barrios disponibles tan próximos, uno de ellos colindante (Barrio Santa Lucia). Pues cabe la posibilidad de reservarlos para usos relacionados con el proyecto. Las alternativas son muy variadas: investigación, formación, hospedaje, empresas tecnológicas, etc... lo que retroalimentaría el proyecto enriqueciéndolo.

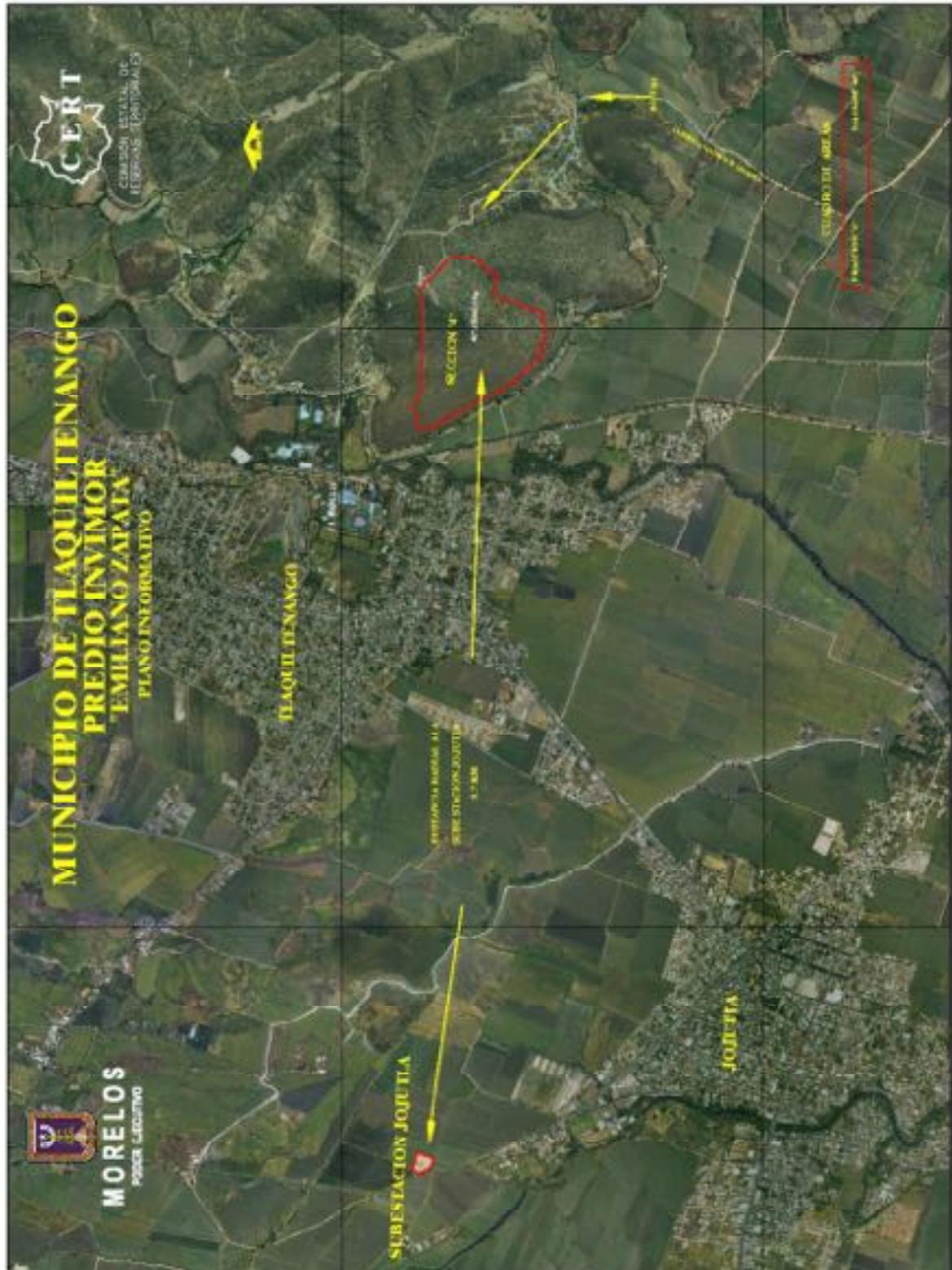
La ubicación del Barrio San Fernando junto a la carretera favorece las comunicaciones por esta vía, necesarias durante la construcción de los edificios, la instalación del equipamiento de la fuente de Luz Síncrotrón y las cabinas de experimentación, pero también con el tiempo para mantenimiento, explotación y nuevas instalaciones.

Al estar los terrenos colindantes edificados se presupone que en ellos se dispone de los servicios públicos mínimos para un uso habitacional: agua potable, desagüe de aguas de lluvia y aguas residuales, recogida de residuos, telecomunicaciones, etc... Previsiblemente, en su mayoría, serán suficientes para el proyecto en cuestión, a excepción del suministro eléctrico que se realizaría desde la Termoeléctrica de Huexca.

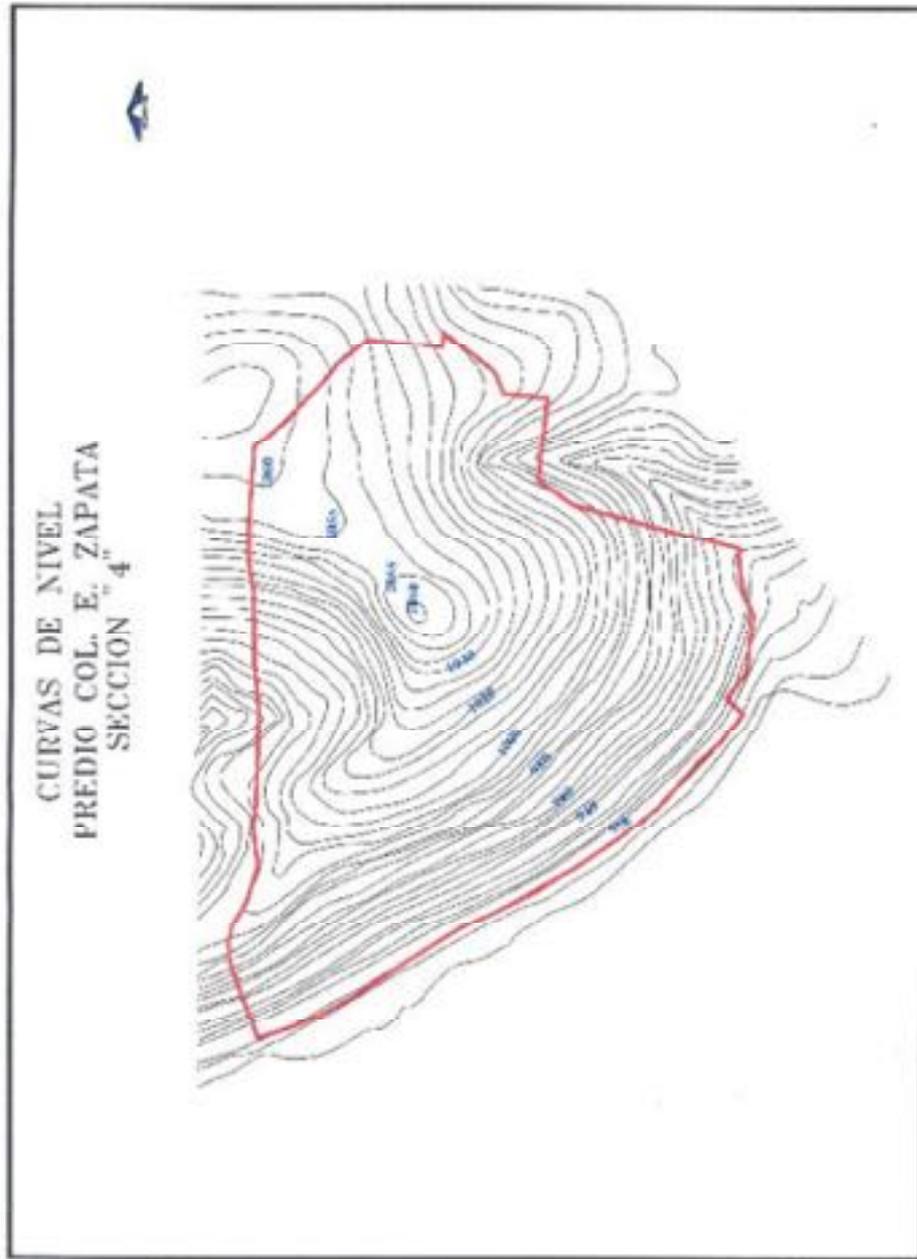
El plano topográfico nos presenta un terreno con un desnivel máximo de 10 m entre sus extremos. Puede considerarse prácticamente llano, lo que optimiza su aprovechamiento. Pudiéndose crear plataformas con pequeñas diferencias de nivel entre ellas para los diferentes edificios, sin que esto afecte su funcionalidad. De esta forma, la topografía del terreno se considera adecuada y no conlleva ningún sobrecoste para el proyecto.

No se dispone de estudio de geotécnico del suelo, luego no se puede analizar la idoneidad del terreno respecto de esta condición.

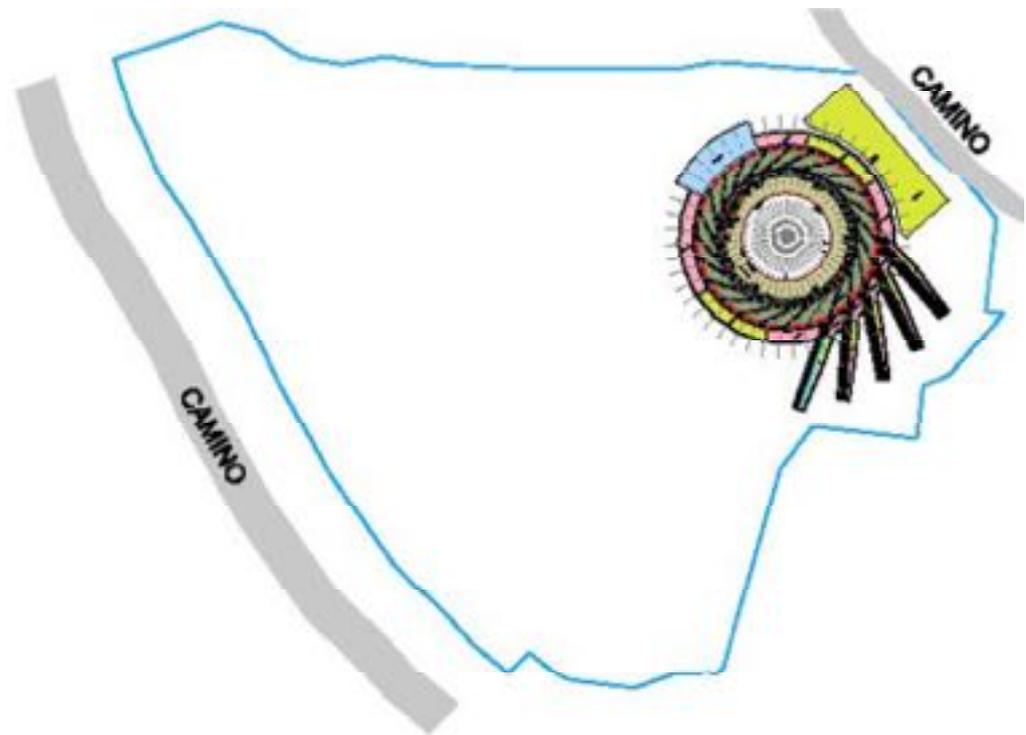
1.4. COLINA EMILIANO ZAPATA, LOCALIDAD: TLAQUILTENANGO



PLANO DEL TERRENO
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



CURVAS DEL TERRENO
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL ESTADO DE MORELOS



EMILIANO ZAPATA
LOCALIDAD: TLAQUILTENANGO
SUP. 344,154 m² - CUMPLE

ESTUDIO DE IDONEIDAD DEL TERRENO

Fig. 4

Colina Emiliano Zapata, Localidad: Tlalquitenango.

El terreno corresponde a la Sección 4ª de la Colina Emiliano Zapata, ubicado en la localidad de Tlalquitenango, a 1,9 Km del núcleo urbano.

Se dispone de plano del terreno con indicación de área y plano topográfico con curvas de nivel. Se ha informado que el suministro eléctrico se haría desde la Subestación de Jojutla, situada a 3,73 km.

Según el plano del terreno, éste dispone de un área más que suficiente para el proyecto: 344.154 m².

De la información topográfica se deduce que presenta un elevado desnivel total de aproximadamente 120 m, desde la base de la colina hasta la cima de la misma.

Dado que la superficie disponible excede de lo estrictamente necesario, se propone ubicar los edificios en la parte alta de este terreno, donde el desnivel es menos pronunciado, 30 m aproximadamente.

En cualquier caso, será necesario realizar un trabajo previo de explanación del terreno. Que aún en el caso de que se planteara la ubicación de cada una de las construcciones en diferente nivel, para adaptarse al terreno, conllevaría un elevado volumen de movimiento de tierras.

Teniendo en cuenta los elevados requerimientos de estabilidad que tiene este proyecto, la primera opción a manejar es la de sustentar el Edificio Principal sobre un estrato uniforme, por ello en primer lugar se evalúa la solución de realizar la excavación del terreno natural. Se estima que será necesario un volumen de excavación para formar las diferentes explanadas de los edificios de aproximadamente 1,5 millones de m³ de tierras. Lo que dependiendo de la excavabilidad del mismo (facilidad o no para dejarse excavar) y la distancia hasta el lugar de vertido de esas tierras, daría lugar a un coste añadido de hasta 10.000 k€. Los cuales habría que añadirlos a la estimación de la inversión total del proyecto, pues no está incluidos en la misma.

Otras alternativas de sustentación del Edificio Principal, como podrían ser el relleno de tierras contra elementos de contención, se considera tiene un comportamiento menos uniforme y menos estable, por tanto en principio no recomendable. En cuanto a realizar sistemas de cimentación que suspendieran el edificio sobre el terreno salvando los desniveles, son constructivamente más complejos aunque técnicamente posibles. Estos sistemas supondrían un sobrecoste en comparación con un procedimiento más convencional, comparable al de la excavación anteriormente indicada. Habría que disponer del estudio geotécnico del suelo para analizar qué alternativas de este tipo son posibles y qué coste tendrían.

En lo que respecta al resto del terreno, no ocupado por el proyecto actual, es decir, la parte inferior de la colina, su aprovechamiento para futuras construcciones asociadas al mismo estaría muy condicionado por su elevada pendiente. Por lo que más allá de pequeñas construcciones conllevaría sobrecostes más elevados que el descrito en la cima.

Como se aprecia en la Fig. 4 existe un camino junto al perímetro del terreno en su parte superior, como se ha indicado, la mejor ubicación de los edificios. Pero se desconoce en este momento si esta vía es apropiada para la circulación de los vehículos pesados y de grandes dimensiones que serán necesarios para transportar todos los componentes tanto durante la construcción como durante la instalación del equipamiento científico y su posterior explotación. En cuanto a la parte baja de la colina, no existe un acceso actualmente.

Al tratarse de un terreno sin urbanizar, previsiblemente carecerá de los servicios públicos necesarios. Se desconoce en este momento la ubicación de los puntos de conexión de los mismos, a excepción de la alimentación eléctrica, y por tanto, cuando se disponga de esta información habrá que evaluar las condiciones y el coste asociados a los mismos.

No se dispone de estudio geotécnico del suelo. Sin embargo, cabe indicar que la imagen del terreno muestra la existencia de un pozo en el extremo superior, así como corrientes superficiales de agua que desembocan en el río Yautepec que discurre próximo a la base de la colina. La presencia de cavidades subterráneas presupone irregularidades en el subsuelo, poco aconsejables para una edificación de estas características. Este aspecto debería analizarse detalladamente en el estudio del suelo.



02A/16

INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA INSTALACION DE LUZ DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS.

-MÉXICO-

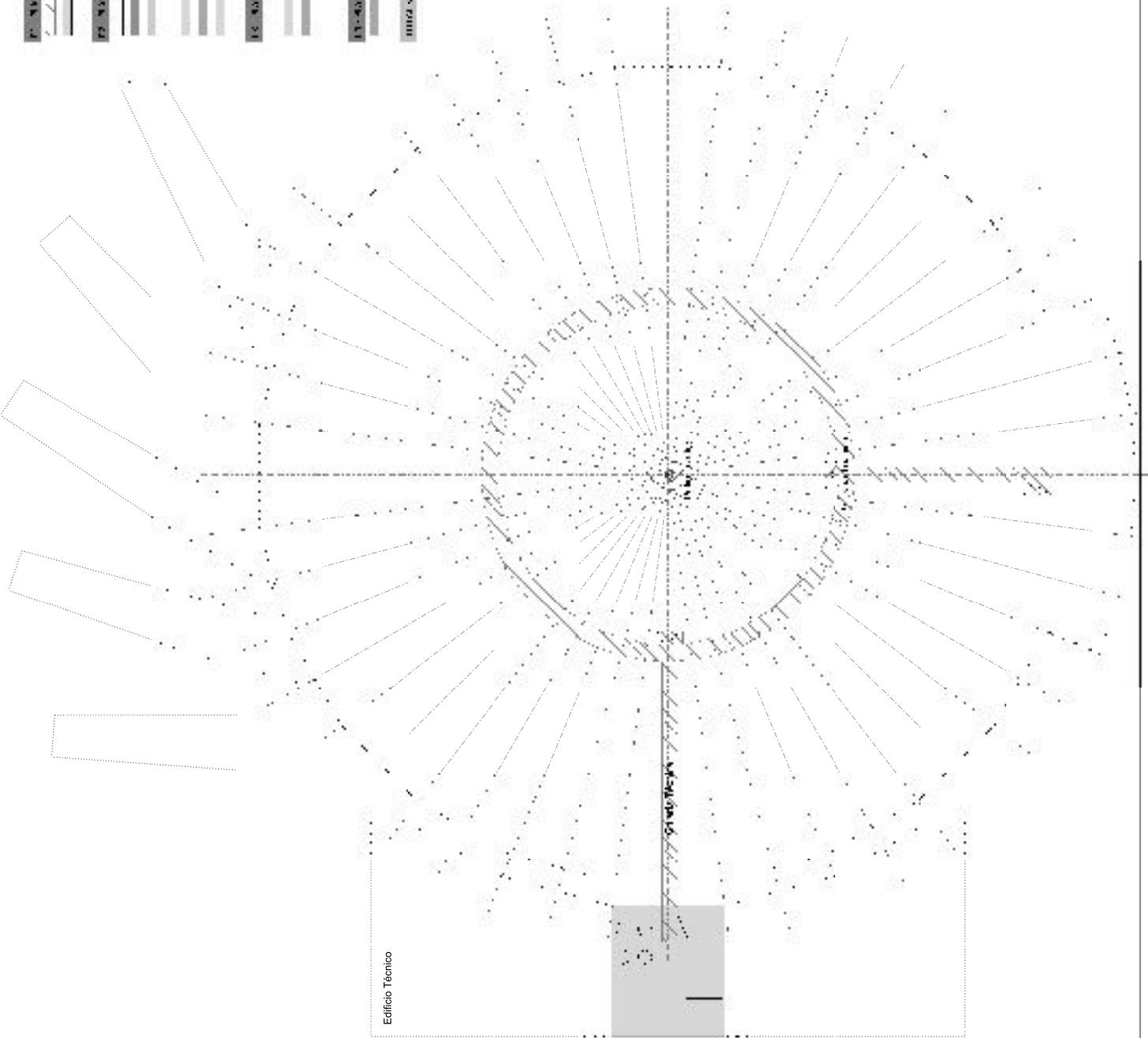
DBA Double Bend Achromat (Red Acromática con Doble Curvatura)

01 - P. SÓTANO

DIN-A3 ESCALA 1/1000



| | |
|-----------------------------|----------------------|
| PLANTA DE SINCROTRON | |
| Área de Sincrotrón | 5.046 m ² |
| Área de Servicios | 5.540 m ² |
| Área de Oficina | 3.020 m ² |
| Área de Generales | 2.300 m ² |
| Área de Técnico | 6.280 m ² |
| PLANTA DE SINCROTRON | |
| Área de Sincrotrón | 5.046 m ² |
| Área de Servicios | 5.540 m ² |
| Área de Oficina | 3.020 m ² |
| Área de Generales | 2.300 m ² |
| Área de Técnico | 6.280 m ² |
| PLANTA DE SINCROTRON | |
| Área de Sincrotrón | 5.046 m ² |
| Área de Servicios | 5.540 m ² |
| Área de Oficina | 3.020 m ² |
| Área de Generales | 2.300 m ² |
| Área de Técnico | 6.280 m ² |



Edificio Técnico



02A/16

INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA INSTALACION DE LUZ DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS.

-MÉXICO-

DBA Double Bend Achromat (Red Achromática con Doble Curvatura)

02 - PLANTA 0

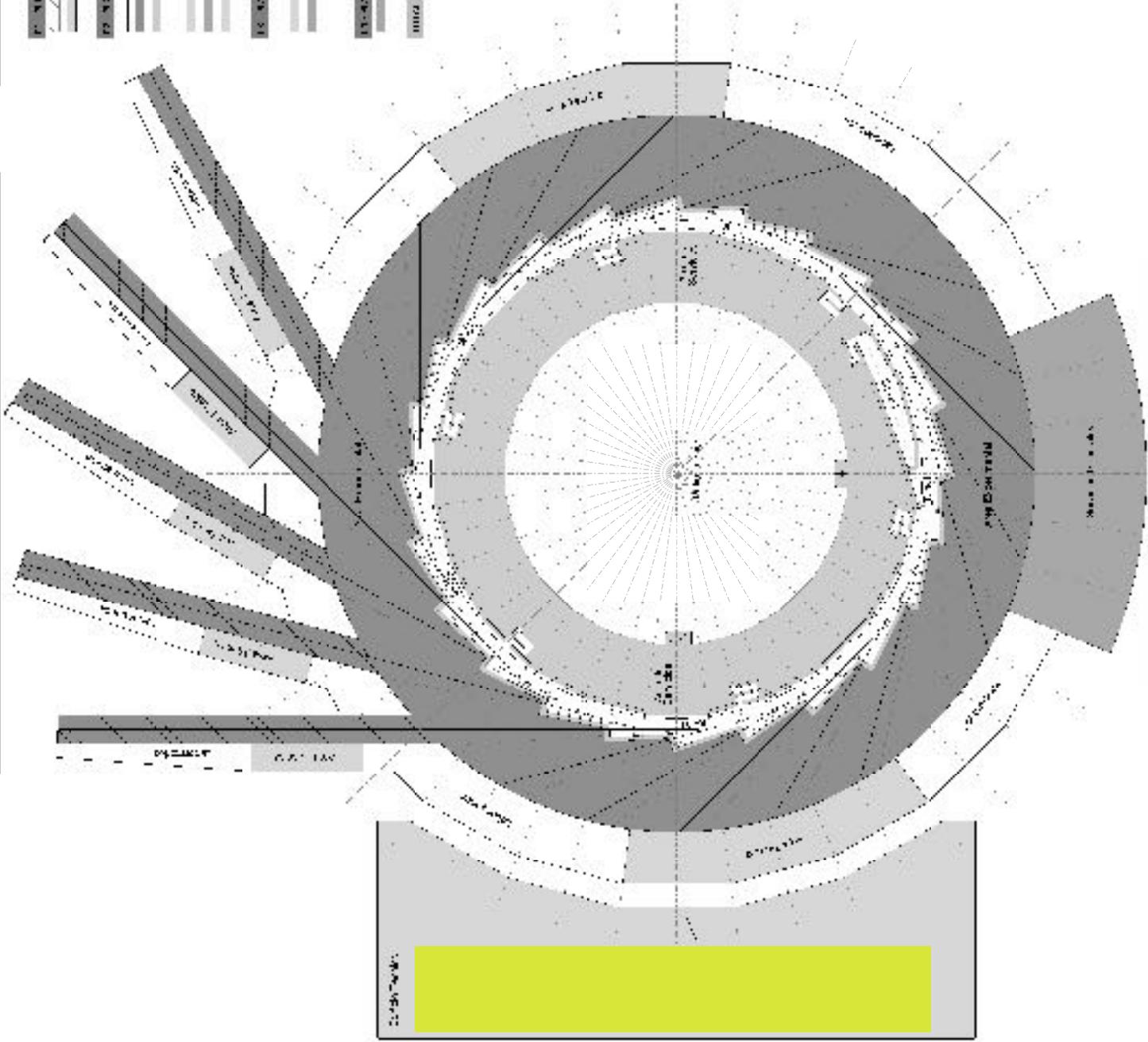
DIN-A3 ESCALA 1/1000



TECNICAS REUNIDAS



| | |
|---------------------|----------------------|
| PLANTA 0 | |
| ÁREA TOTAL | 6.280 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 0 | 5.086 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 1 | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 2 | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 3 | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 4 | 6.280 m ² |
| PLANTA 1 | |
| ÁREA TOTAL | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 1 | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 2 | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 3 | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 4 | 6.280 m ² |
| PLANTA 2 | |
| ÁREA TOTAL | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 1 | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 2 | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 3 | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 4 | 6.280 m ² |
| PLANTA 3 | |
| ÁREA TOTAL | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 1 | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 2 | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 3 | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 4 | 6.280 m ² |
| PLANTA 4 | |
| ÁREA TOTAL | 6.280 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 1 | 5.540 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 2 | 3.020 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 3 | 2.300 m ² |
| ÁREA DE LA PLANTA 4 | 6.280 m ² |





02A/16

INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA INSTALACION DE LUZ DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS.

-MÉXICO-

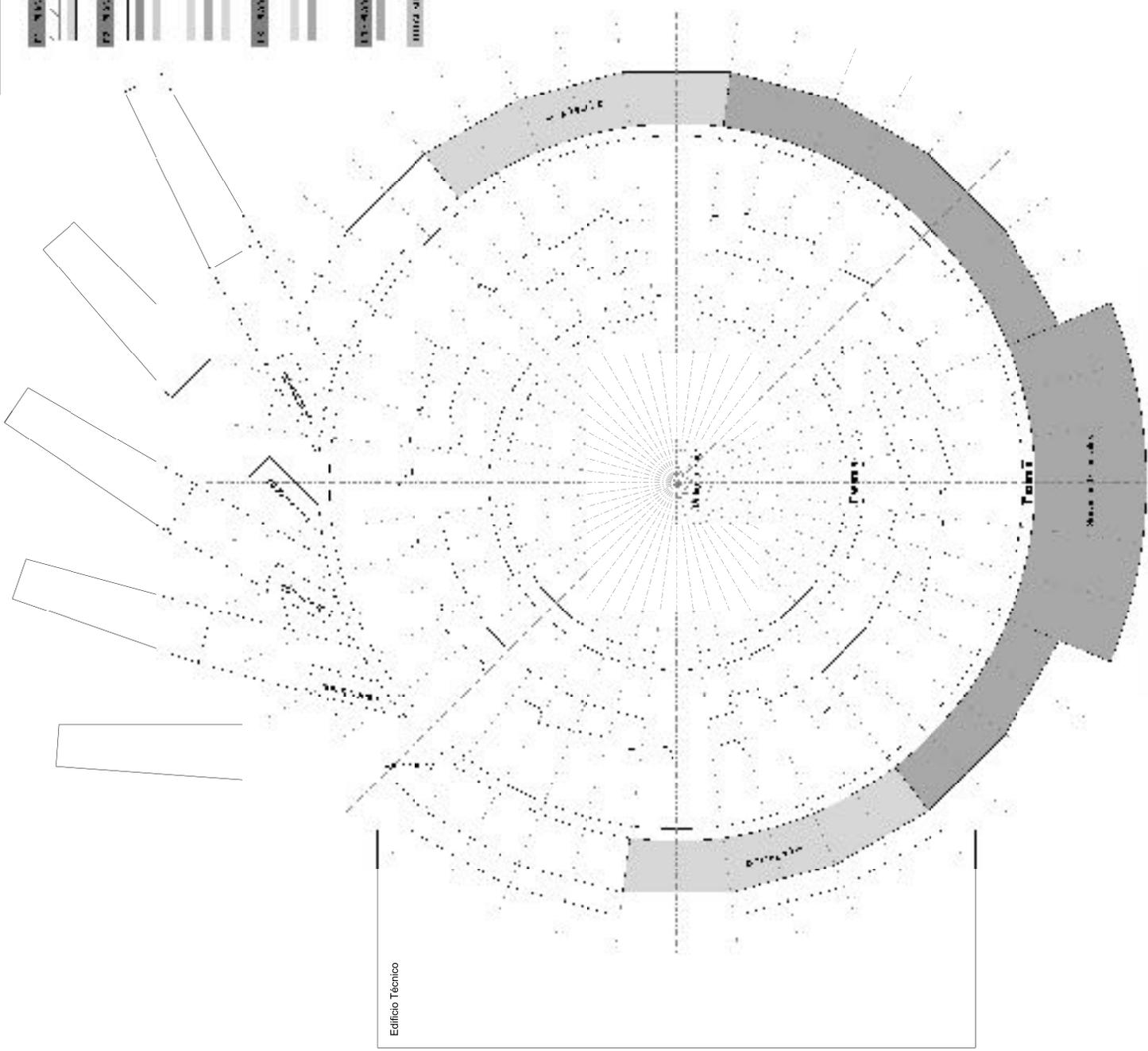
DBA Double Bend Achromat (Red Acromática con Doble Curvatura)

03 - PLANTA 1

DIN-A3 ESCALA 1/1000



| | |
|-----------------------------|----------------------|
| PLANTA 03 - PLANTA 1 | |
| Área total | 6.280 m ² |
| Área cubierta | 5.046 m ² |
| Área de servicios | 5.540 m ² |
| Área de oficina | 3.020 m ² |
| Área de generales | 2.300 m ² |
| Área de técnico | 6.280 m ² |





02A/16

INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA INSTALACION DE LUZ DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS.

-MÉXICO-

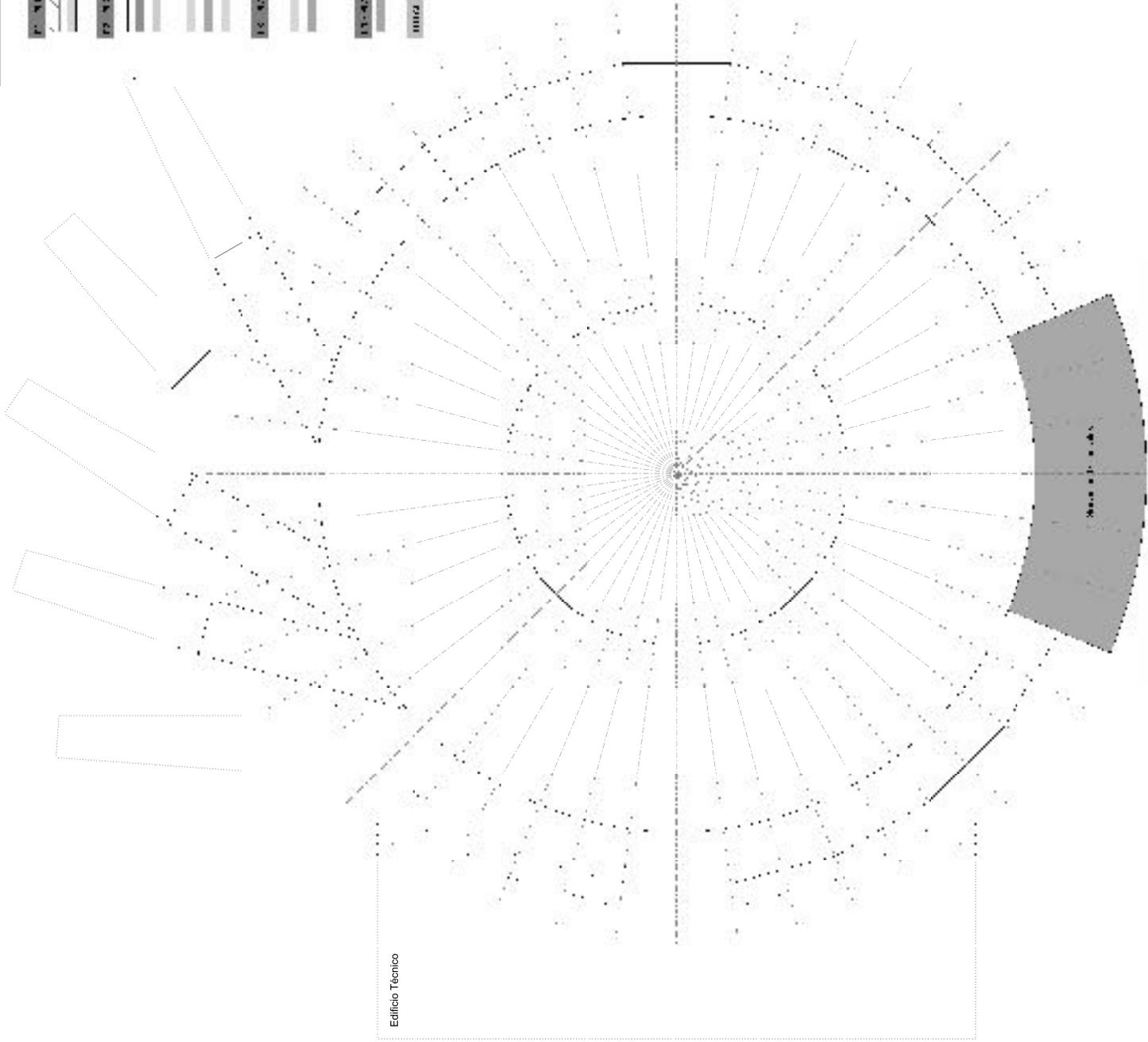
DBA Double Bend Achromat (Red Acromática con Doble Curvatura)

04 - PLANTA 2

DIN-A3 ESCALA 1/1000



| | |
|--------------------|----------------------|
| PLANTA 01 | |
| ÁREA TOTAL | 6.280 m ² |
| ÁREA DE SINCROTRON | 5.046 m ² |
| ÁREA DE SERVICIOS | 5.540 m ² |
| ÁREA DE OFICINA | 3.020 m ² |
| ÁREA DE GENERALES | 2.300 m ² |
| ÁREA DE TÉCNICO | 6.280 m ² |
| PLANTA 02 | |
| ÁREA TOTAL | 6.280 m ² |
| ÁREA DE SINCROTRON | 5.046 m ² |
| ÁREA DE SERVICIOS | 5.540 m ² |
| ÁREA DE OFICINA | 3.020 m ² |
| ÁREA DE GENERALES | 2.300 m ² |
| ÁREA DE TÉCNICO | 6.280 m ² |
| PLANTA 03 | |
| ÁREA TOTAL | 6.280 m ² |
| ÁREA DE SINCROTRON | 5.046 m ² |
| ÁREA DE SERVICIOS | 5.540 m ² |
| ÁREA DE OFICINA | 3.020 m ² |
| ÁREA DE GENERALES | 2.300 m ² |
| ÁREA DE TÉCNICO | 6.280 m ² |



Edificio Técnico



02A/16

INFORME INICIAL DE UN ESTUDIO DE IMPLANTACION DE UNA INSTALACION DE SINCROTRON EN EL ESTADO DE MORELOS.

-MÉXICO-

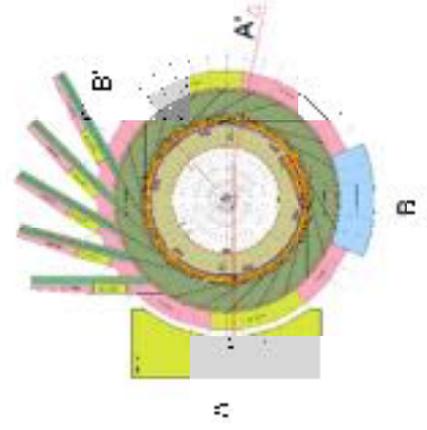
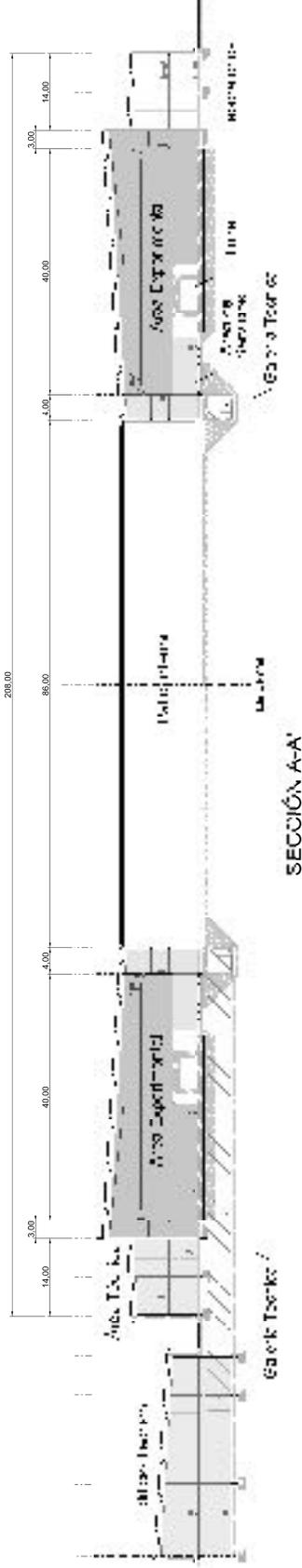
DBA Double Bend Achromat (Red Acromática con Doble Curvatura)

05 - SECCIONES

DIN-A3 ESCALA sin escala



TECNICAS REUNIDAS





02A/16

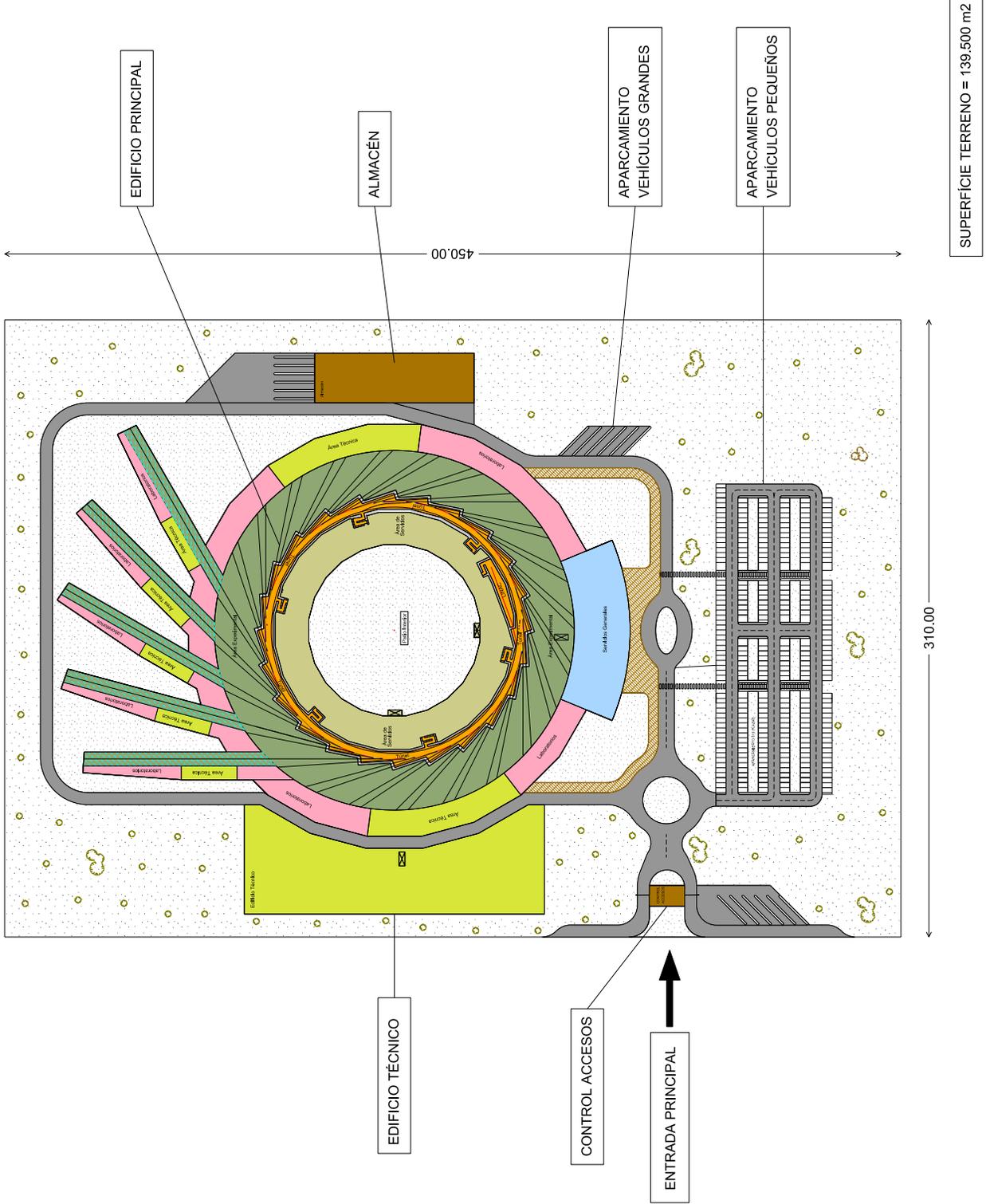
INFORME INICIAL
DE UN ESTUDIO
DE IMPLANTACION
DE UNA
INSTALACION
DE LUZ
DE SINCROTRON
EN EL ESTADO
DE MORELOS.

-MÉXICO-

·DBA·
Double Bend Achromat
(Red Achromática con Doble Curvatura)

07 - IMPLANTACIÓN

DIN-A3
ESCALA 1/2000



EDIFICIO PRINCIPAL

ALMACÉN

APARCAMIENTO
VEHICULOS GRANDES

APARCAMIENTO
VEHICULOS PEQUEÑOS

450.00

310.00

SUPERFICIE TERRENO = 139.500 m2

EDIFICIO TÉCNICO

CONTROL ACCESOS

ENTRADA PRINCIPAL



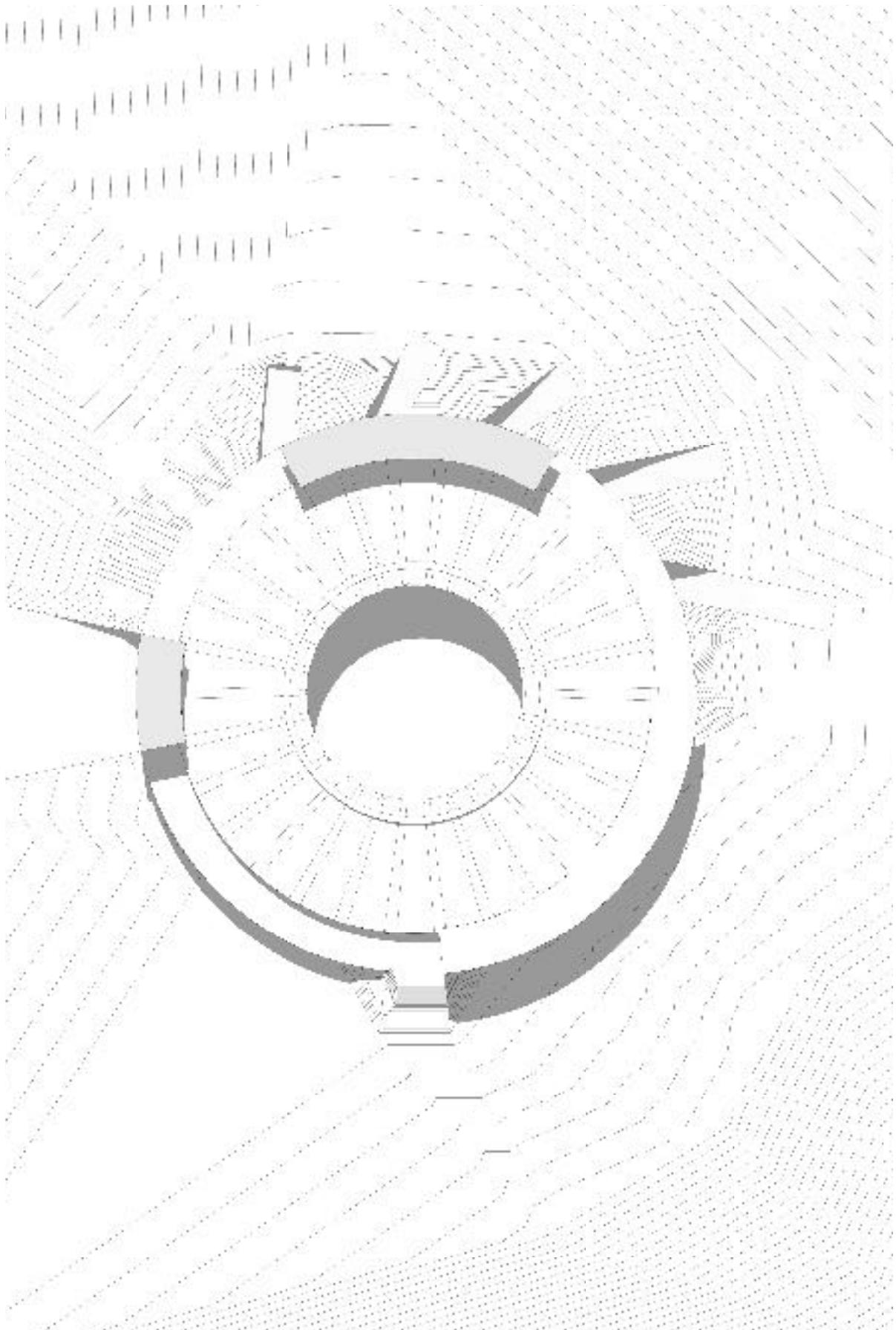
PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Anteproyecto Arquitectónico

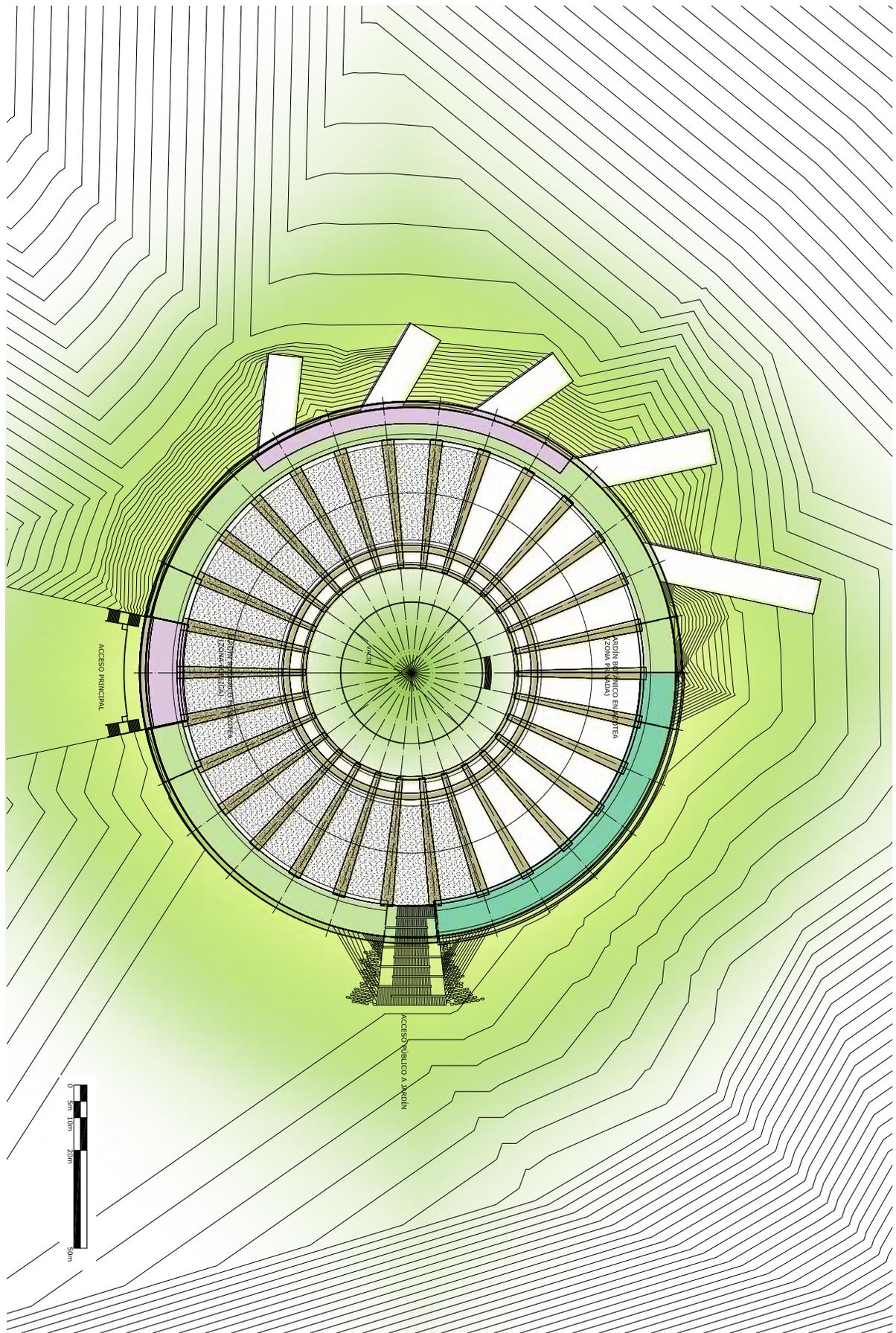
3A + C Arquitectos

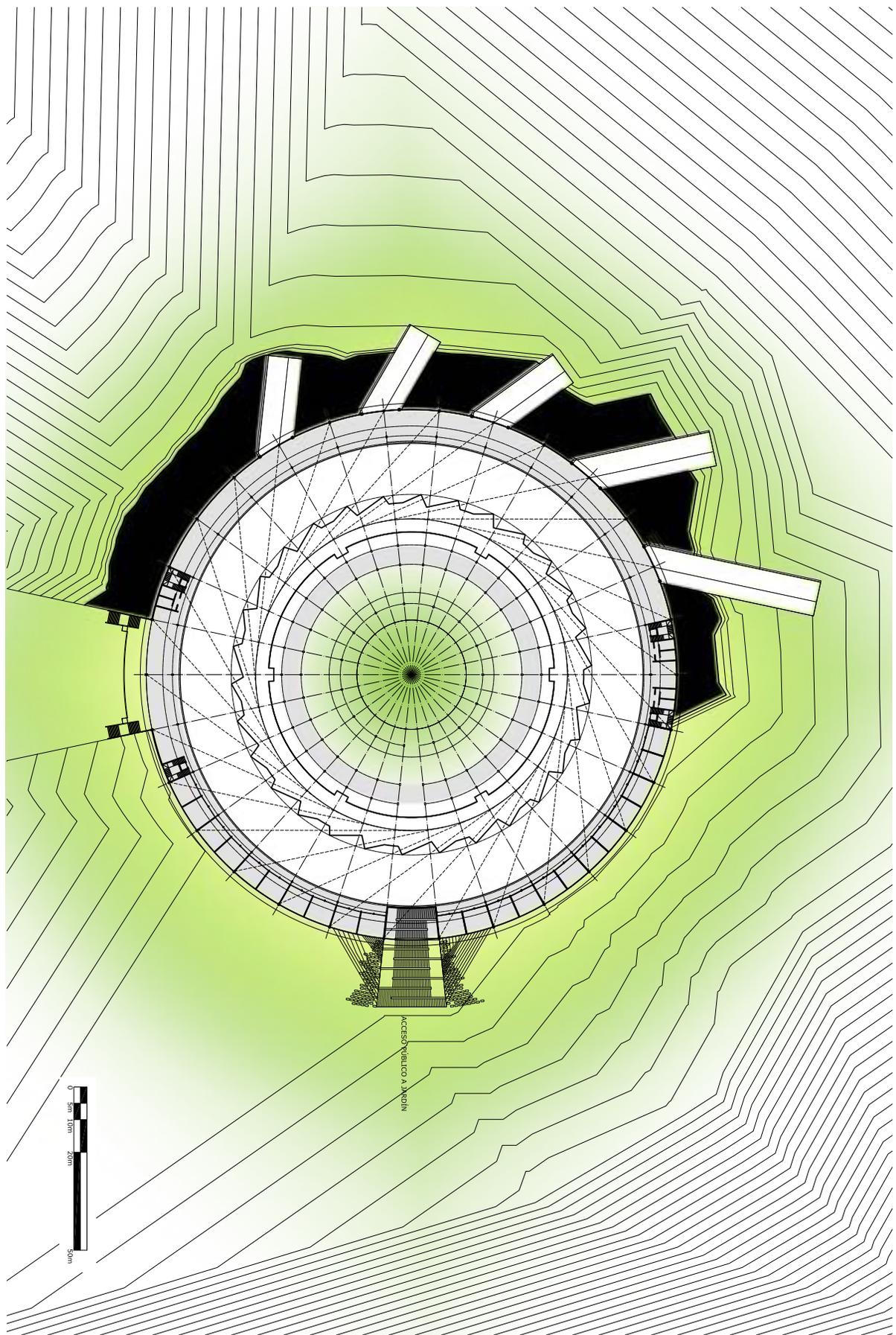




planta de conjunto

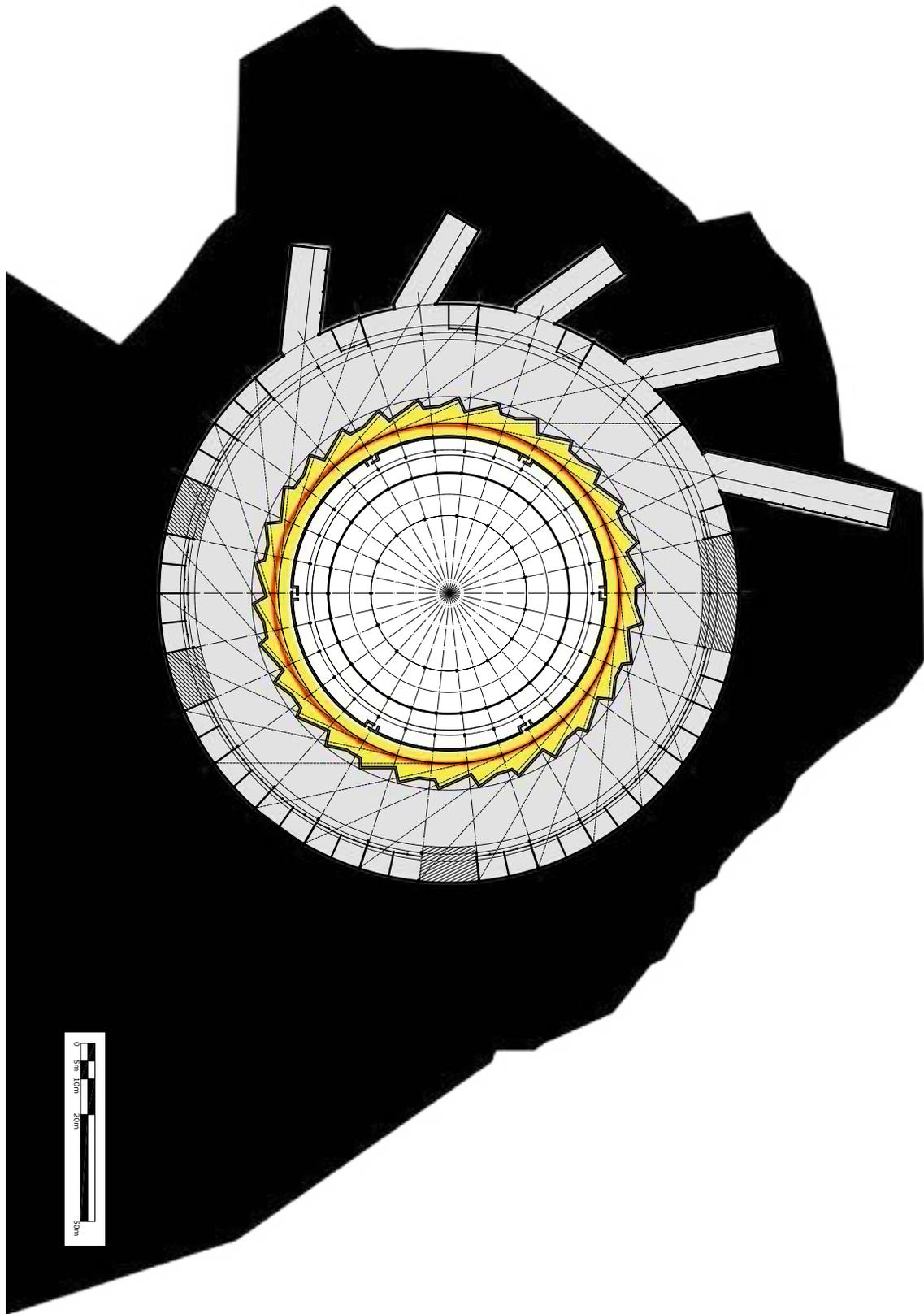






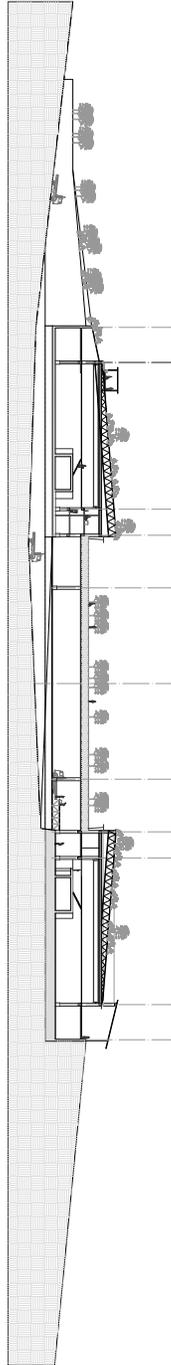
planta de oficinas (primer piso)





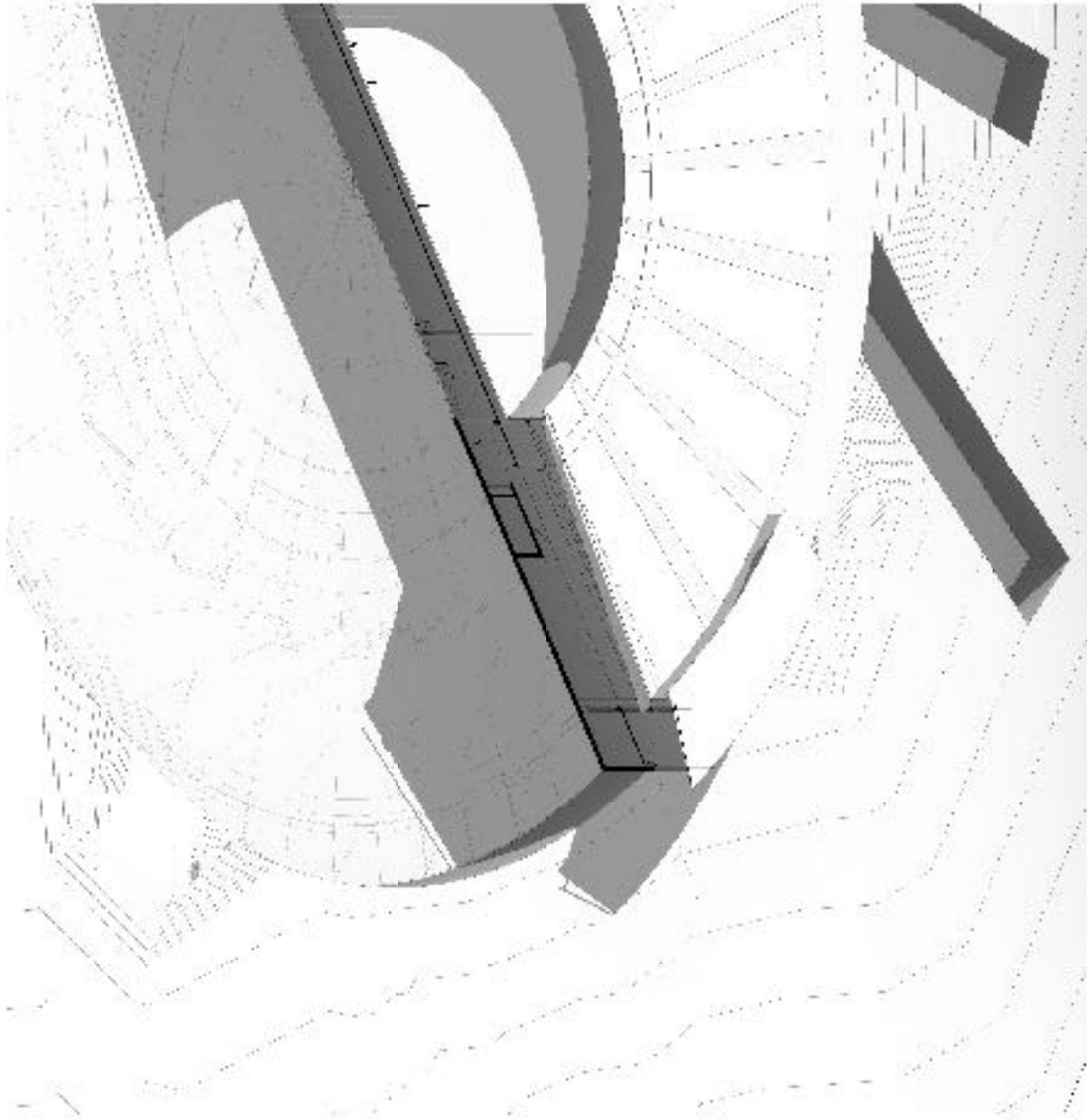
planta de laboratorios (semi-sótano)

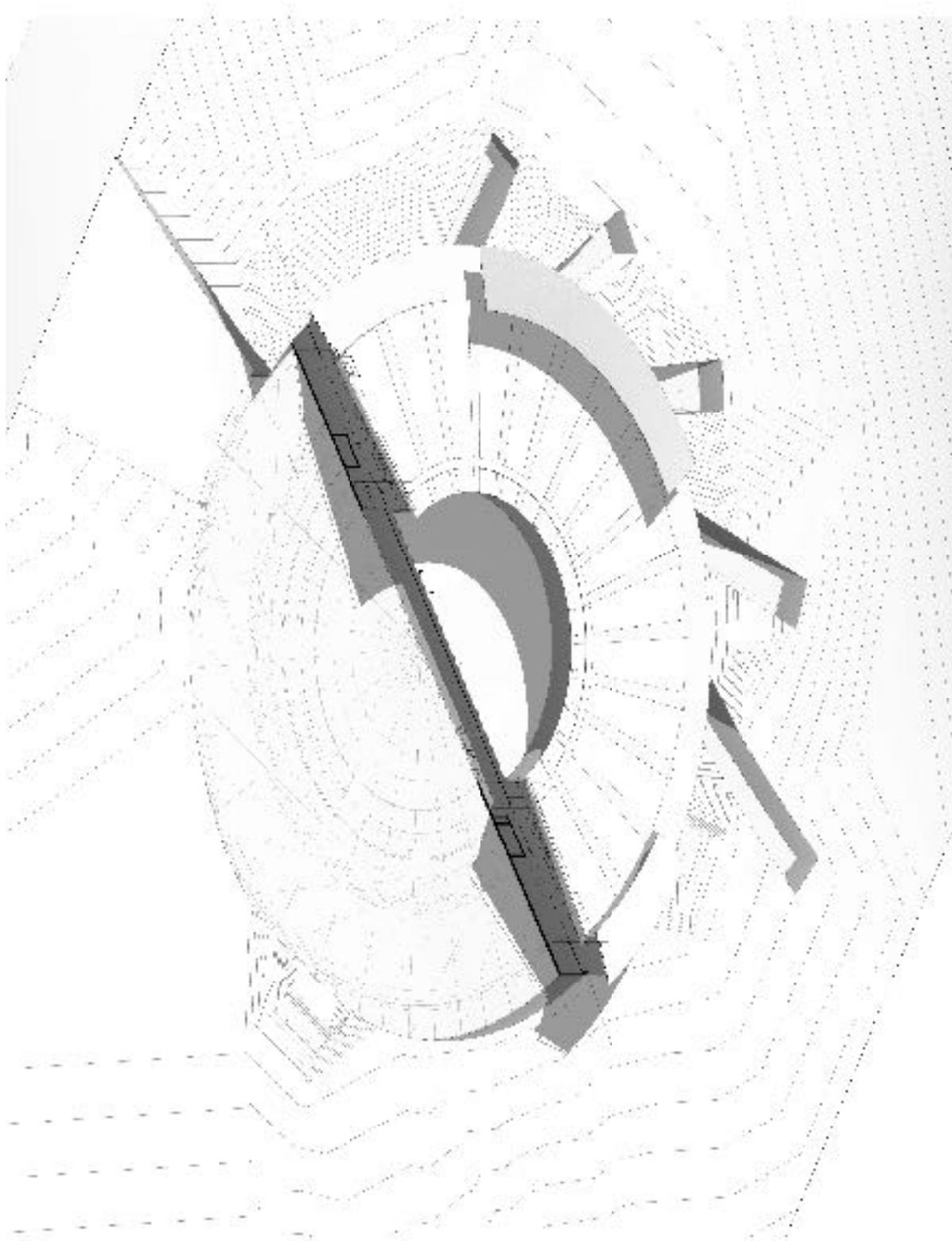




corte longitudinal

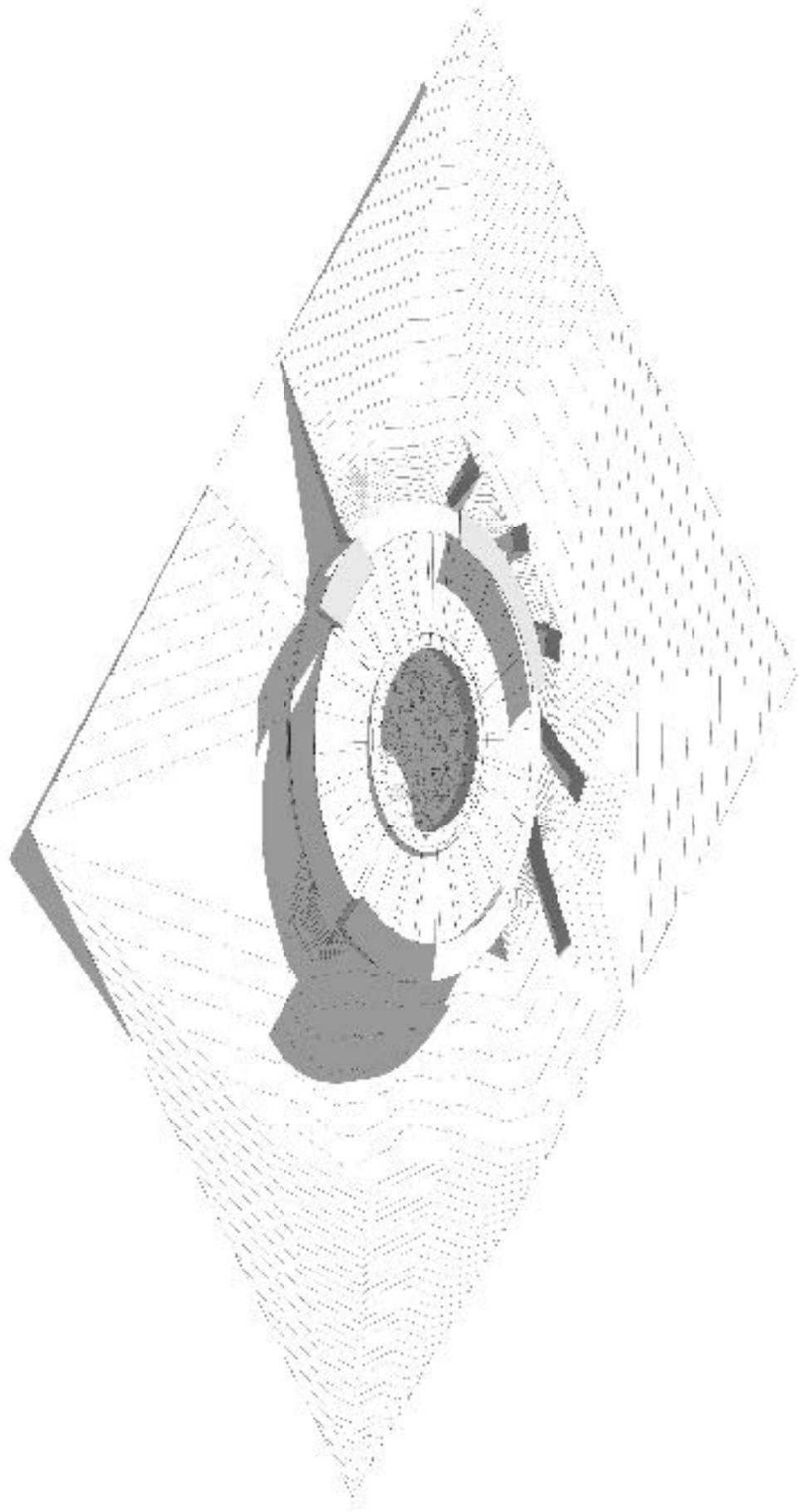






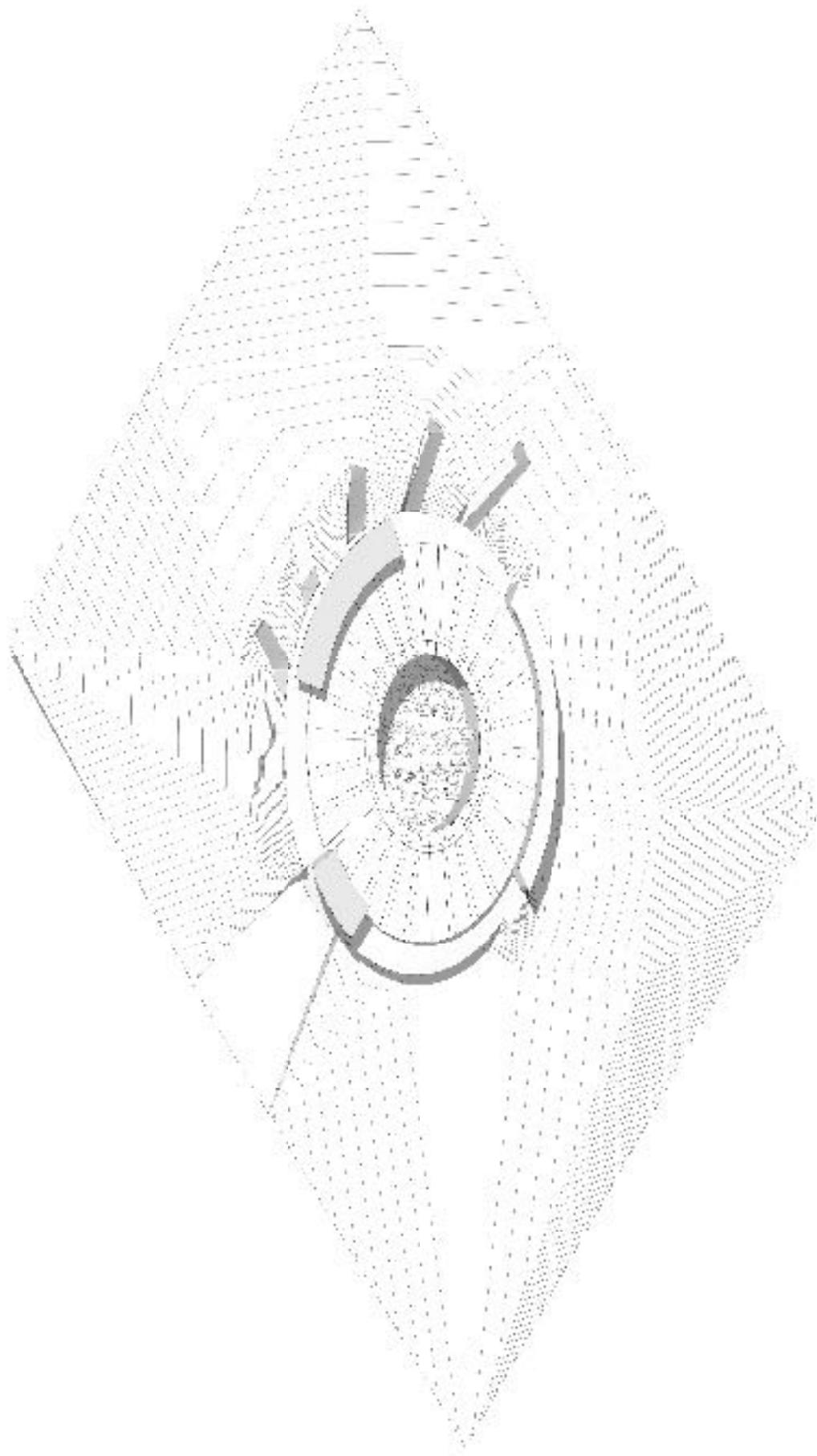
corte de conjunto





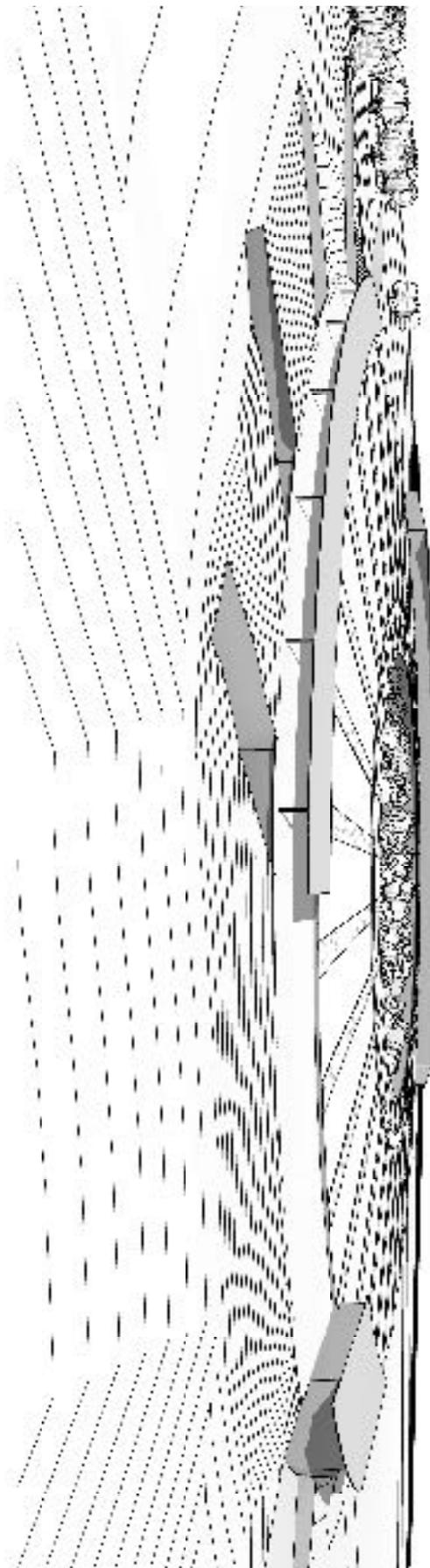
isométrico de conjunto suroriente





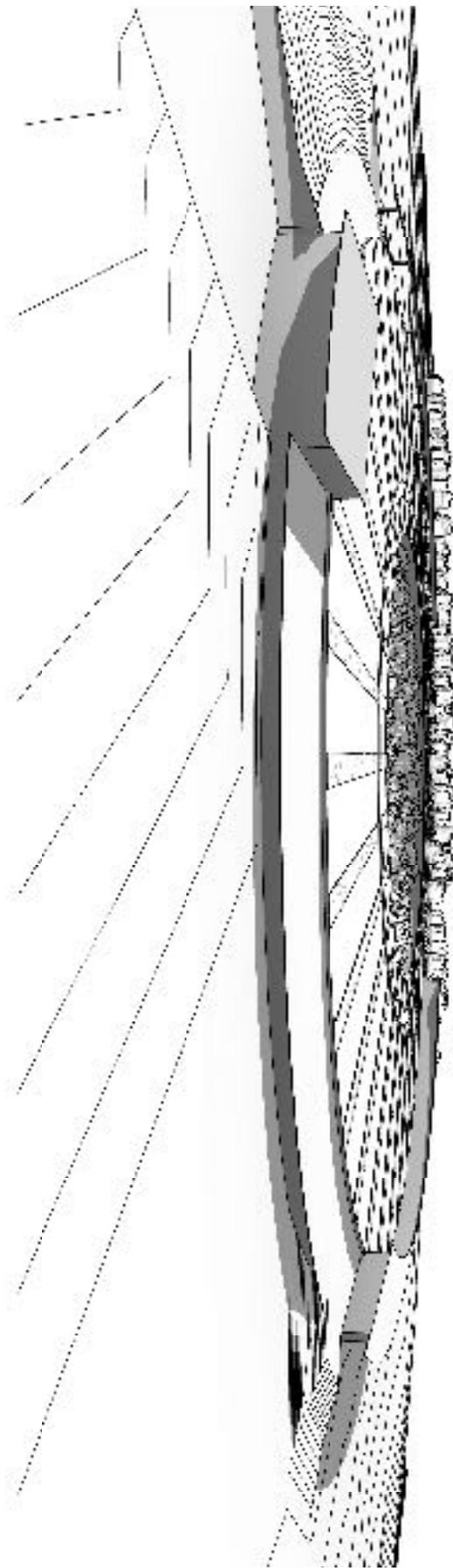
isométrico de conjunto surponiente





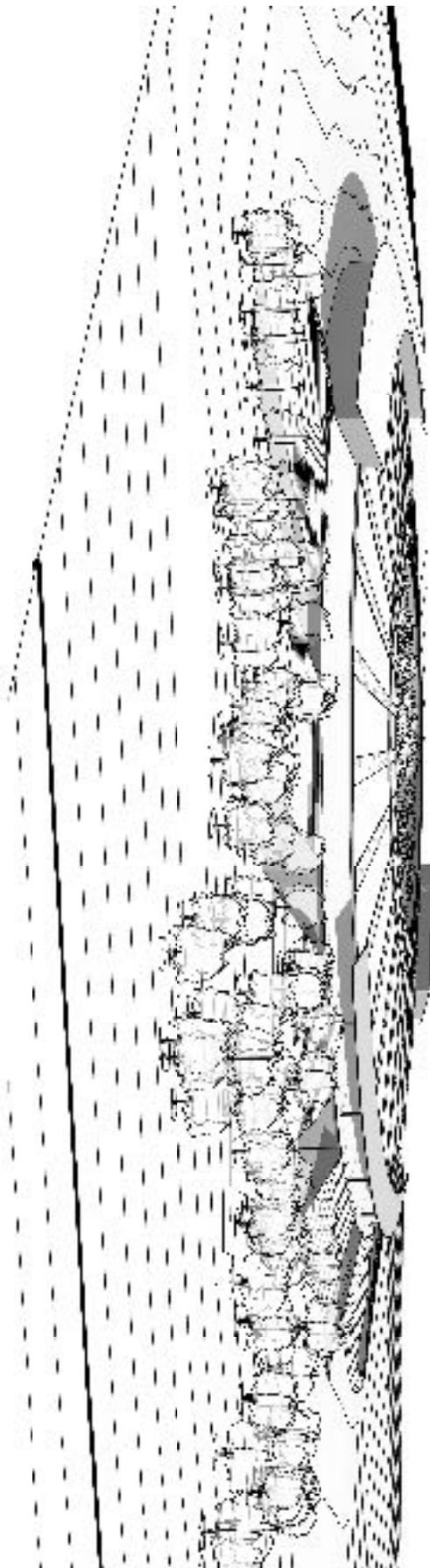
vista surponiente





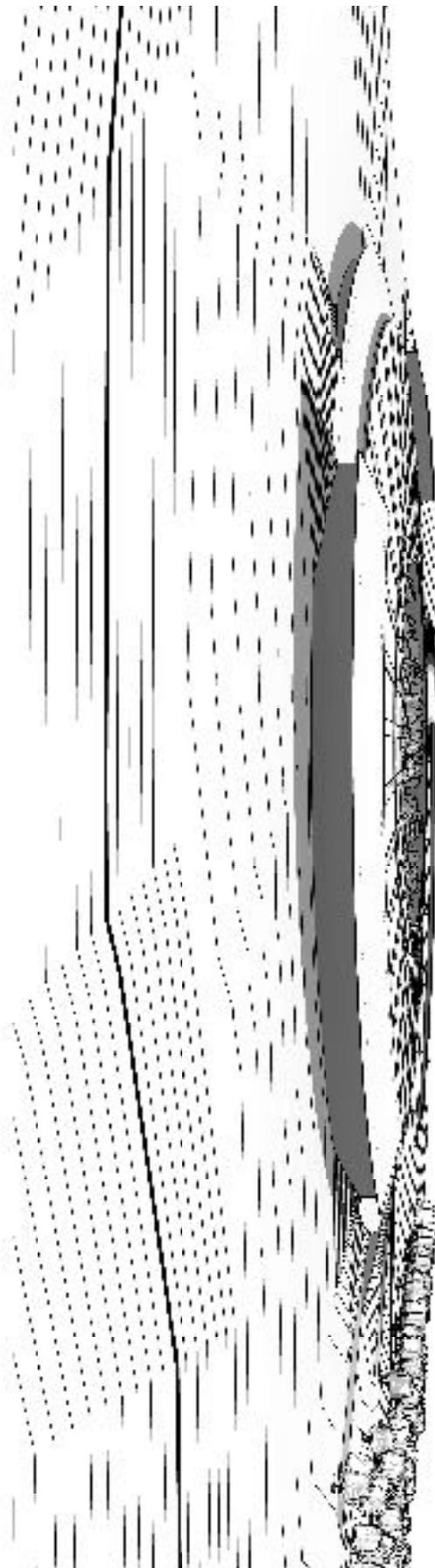
vista suroriente





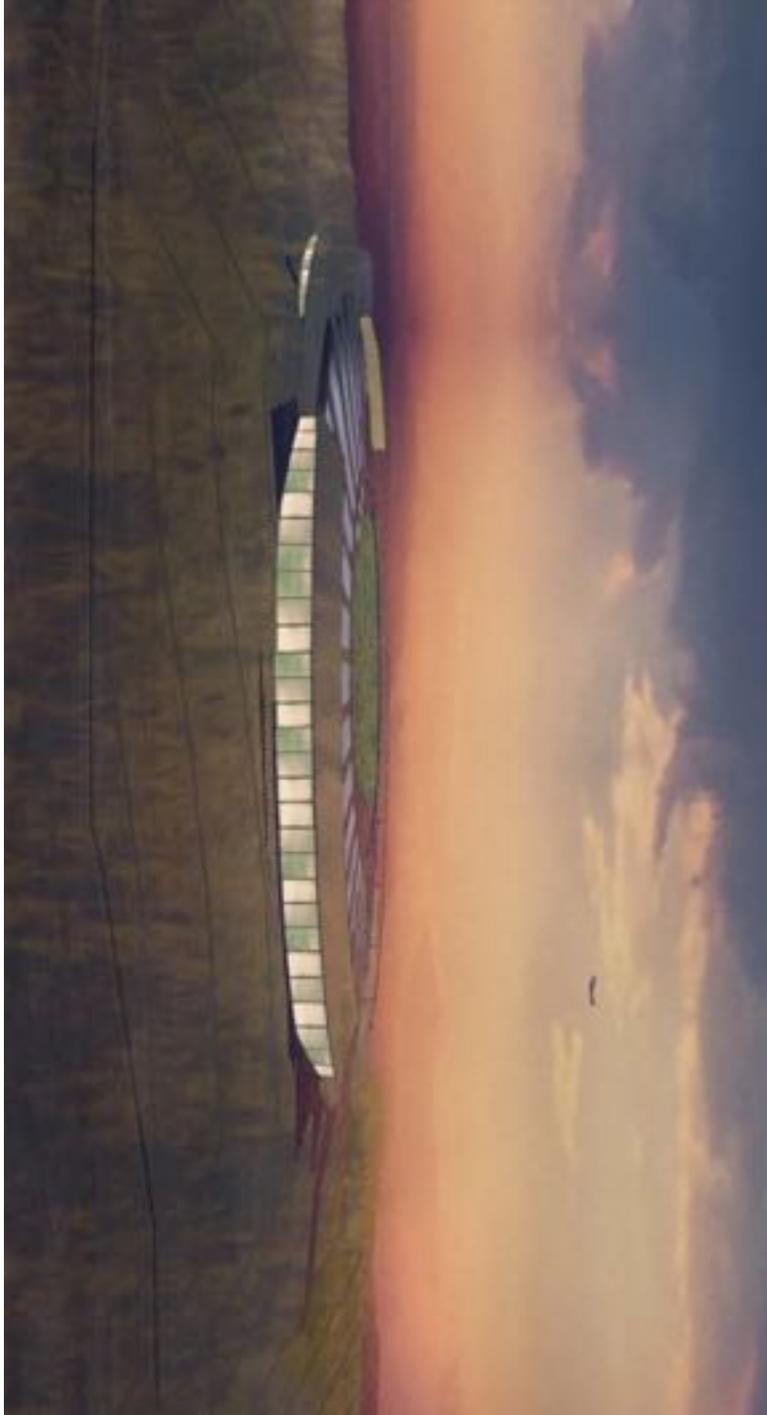
vista norponiente





vista nororiente





sincrotrón méxico





sincrotrón méxico





PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Estudio Para Determinar Regiones de Alto Perfil Para la Localización de un Sincrotrón en Morelos

Fernando Matías Moreno Yntriago
Edgar Andrés Sánchez García

Estudio para determinar regiones de alto perfil para la localización de un Sincrotrón en Morelos

Fernando Matías Moreno Yntriago & Edgar Andrés Sánchez García
INSTITUTO DE FÍSICA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 04510
MÉXICO

1 Introducción

Dentro de los sistemas de información geográfica, los métodos bayesianos para la delimitación de regiones de alto potencial ha sido un tema ampliamente estudiado, al momento de hacer predicciones a partir de datos ya conocidos, es decir, basándose en información ya obtenida, registros ya recolectados, zonas con las características perfectamente conocidas y estudiadas.

Por ejemplo, si quisiéramos hacer una predicción para las regiones que tienen alta probabilidad de presentar hundimientos en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel, deberíamos de tener registros de hundimientos previos, bien documentados y localizados en un sistema de información geográfica.

Además de esto, necesitamos el auxilio de un experto en el recurso que buscamos (mineral, natural, ecológico, topográfico, económico, etc.), pues es de suma importancia determinar que factores físicos, químicos, geológicos, morfológicos, humanos, sociales, etcétera, representan un buen indicador (evidencia) de que nuestro recurso esté presente o no lo esté. Continuando con el ejemplo de la reserva ecológica, serían los precursores de hundimientos del suelo, por ejemplo, algún tipo de suelo en particular o algún tipo de rasgo geológico. La primera idea que nos viene a la cabeza,

es que si tenemos regiones donde ya está presente el recurso de interés, se estudie con calma y a profundidad todos aquellos factores que se presentan por igual en aquellos sitios, sin embargo, el especialista siempre nos dará orientación sobre que criterios tomar como buenas y verdaderas evidencias.

A continuación expondremos brevemente la metodología de los pesos de evidencia. Para empezar, tendremos una región de interés, es decir, una zona en la que busquemos nuestro recurso, para fines prácticos y sin pérdida de generalidad la preferiremos rectangular, con dimensiones bien definidas (en particular área $A(T)$) además, en dicha región trazaremos una malla con ancho y largo de celda determinados por nosotros, en la práctica esto viene acotado por la potencia de cómputo de la que dispongamos, si queremos cálculos muy finos, tendríamos que trazar una retícula con celdas pequeñas. Como habíamos dicho, requerimos lugares bien delimitados donde aparezca el recurso que nosotros buscamos, dicha región tendrá un área conocida $A(R)$, de esta manera tendremos la probabilidad a priori de encontrar nuestro recurso en cada cuadro de nuestra tesela:

$$P(R) = \frac{A(R)}{A(T)}$$

La idea ahora es contemplar cómo es que los factores favorables condicionan la presencia de nuestro recurso en cualquier celda de nuestra área $A(T)$, con esto en mente, debemos de contar con la información de la distribución de nuestras evidencias (factores favorables) en nuestra región de interés, con toda la información geográfica importante (en particular el área de cada evidencia $A(F_i)$). Entonces, la probabilidad de encontrar la evidencia F_i en una celda de nuestra región sería:

$$P(F_i) = \frac{A(F_i)}{A(T)}$$

A continuación, por el teorema de Bayes, sabemos que la probabilidad de encontrar nuestro recurso, dado que está presente la evidencia F_i se escribe:

$$P(R|F_i) = \frac{P(R \cap F_i)}{P(F_i)} = \frac{A(R \cap F_i)}{A(F_i)}$$

Donde $A(R \cap F_i)$ es el área que intersecta nuestra evidencia con el área donde ya se encuentra nuestro recurso, no hace falta decir que una "buena" evidencia debe de tener una intersección importante con esta región. Por otro lado, la independencia condicional (que supondremos entre nuestras evidencias) la podemos escribir de dos maneras, primero cuando queremos aplicar el teorema de Bayes a muchas condiciones:

$$P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n | R) = P(F_1 | R)P(F_2 | R) \dots P(F_n | R) \quad (1)$$

Y también a la hora de escribir la probabilidad de encontrar una intersección de evidencias:

$$P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n) = P(F_1)P(F_2)\dots P(F_n) \quad (2)$$

Ahora, supongamos que en una determinada celda de la retícula me encuentro con la intersección de muchas evidencias (m de ellas), entonces la probabilidad de encontrar el recurso dado que estén presentes, sería:

$$\begin{aligned} P(R|F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m) &= \frac{P(R \cap F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m)}{P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m)} = \\ &= P(R) \frac{P(R \cap F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m)}{P(R)P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m)} = P(R) \frac{P(\cap F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m | R)}{P(F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m)} \end{aligned}$$

Y ocupando (1) y (2) podemos escribir la probabilidad que nos interesa:

$$P(R|F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_m) = P(R) \frac{P(F_1|R)P(F_2|R)\dots P(F_m|R)}{P(F_1)P(F_2)\dots P(F_m)}$$

Si nos preguntamos cual es la probabilidad de encontrar nuestro recurso cuando una evidencia F_j NO está presente, los sabremos con:

$$P(R|\overline{F_j}) = \frac{P(R \cap \overline{F_j})}{P(\overline{F_j})} = \frac{A(R) - A(R \cap F_j)}{A(R) - A(F_j)}$$

Así, en cualquier celda, si tengo presentes m evidencias y ausentes l , la probabilidad a posteriori de encontrar el recurso dadas estas condiciones sería:

$$\begin{aligned} P(R|F_1 \cap \dots \cap F_m \cap \overline{F_{m+1}} \cap \dots \cap \overline{F_{m+l}}) &= \\ &= P(R) \frac{P(F_1|R)\dots P(F_m|R)P(\overline{F_{m+1}}|R)\dots P(\overline{F_{m+l}}|R)}{P(F_1)\dots P(F_m)P(\overline{F_{m+1}})\dots P(\overline{F_{m+l}})} \end{aligned} \quad (3)$$

En la práctica, lo que tenemos que hacer es pararnos en una de las celdas de la cuadrícula y preguntar si ahí están presentes o ausentes cada una de nuestras evidencias, una vez que sepamos cuales son las que existen y cuales no existen, finalmente calculamos la probabilidad a posteriori para esa celda con la fórmula (3); habremos concluido cuando hagamos esto para todas las celdas.

2 Selección de evidencias

Para poder identificar los factores que favorecen la ubicación de nuestro Sincrotrón, estudiamos el sitio de un laboratorio con las mismas características, por ejemplo el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Long Island, Estados Unidos, que cuenta con una fuente de luz, el *National Synchrotron Light Source II*, con el perfil que nosotros deseamos.

Basándonos en las Referencias[2, 3, 4, 5], podemos argumentar que desde el punto de vista edafológico, es preciso contar con un suelo rico en arcillas por un lado, tal cual se presenta en *The National Synchrotron Light Source II*, y sin un significado agrícola importante por el otro, pues queremos evitar a toda costa el daño ecológico, social y político que nuestra propuesta pueda traer. De acuerdo a la clasificación del suelo de la FAO[6], dichos suelos contarán con la referencia de Vertisoles y Regosoles, ricos en arcilla los primeros y con poca importancia agrícola los segundos, además de presentar una baja retención de humedad, lo que es importante a la hora de evitar cualquier contingencia hídrica.

Basados en las mismas referencias, podemos argumentar que debemos de contar con una superficie geológica rica en areniscas y grava, con depósitos de conglomerado y basalto, pues en tales condiciones no se esperan hundimientos o debilitación del suelo, además se hace hincapié en la ausencia de características Karsticas, lo que nosotros seguimos en nuestra elección de elementos favorables.

Es claro que debemos de seleccionar una región de fácil acceso, que no se encuentre en una zona aislada o mal comunicada, es decir, debemos de optar por aquellas que no se encuentren alejadas de vías de transporte bien habilitadas (carreteras pavimentadas). A partir de esto, a cualquier carretera que tenemos le hemos asociado una región aceptable, un *buffer* (área de influencia), a ambos lados, el que nosotros fijamos en dos kilómetros de ancho (con la carretera en medio).

Además de esto, debemos de contar con líneas de transmisión de energía eléctrica (líneas en torres de acero) en las inmediaciones, no hace falta decir que éste es un factor determinante. También a cada línea que nosotros ubiquemos debemos de asociarle un *buffer*, que nosotros hemos fijado de dos kilómetros de ancho (con la línea en medio).

Habrá que descartar las áreas que presentan relieve accidentado, escarpado o no tienen un buen perfil topográfico, es decir, hemos escogido regiones catalogadas como llanuras, mesetas, valles o lomeríos según el INEGI a partir de cartas de re-

lieve.

Es muy importante ubicarnos en una región que no se encuentre brindando servicios ecológicos, agrícolas, urbanos o de cualquier índole, a fin de evitar confrontaciones y posibles problemas de interés, a favor de este punto, hemos seleccionado las regiones que entran en la categoría de pastizales o matorrales, dejando de lado zonas con cualquier actividad antes mencionada.

Con motivo de asegurar la integridad de las instalaciones, nos interesamos por zonas que no se encuentren cerca de corrientes de agua superficiales. Obteniendo las capas directamente del INEGI, a cada corriente superficial le hemos asociado un *buffer* de dos kilómetros de ancho (con la corriente en medio). Dejamos claro de una vez que la región de evidencia es toda aquella que no esté cerca de las corrientes superficiales.

También es relevante el registro de fallas y fracturas geológicas, a las cuales les asociamos un *buffer* de cuatro kilómetros de ancho (con la falla o fractura en medio). Al igual que con las corrientes, la región de evidencia es toda aquella que no cuente con fallas o fracturas.

Buscamos y estudiamos las regiones que presentan algún tipo de riesgo volcánico, encontramos registros de flujo de derrames volcánicos, los que muestran zonas de asentamiento de cenizas. Además de esto, excluimos a propósito una circunferencia de 30 kilómetros de radio con centro en el cráter del volcán Popocatepetl. La región de evidencia es toda aquella que no cuente con registros de flujo de derrame volcánico ni esté dentro de la circunferencia.

Como detalle final, buscamos zonas de escasa humedad, para el estado de Morelos resulta ser de una presencia mínima de seis meses. Dicha capa es nuestra décima evidencia.

3 Implementación y Resultados

Comenzamos por la selección de nuestros datos entre todos los que nos fueron facilitados por el INEGI (Ver referencias [7, 8, 9, 10, 13]). Todos ellos los trabajamos en el software libre QGIS, con el que pudimos obtener exactamente las capas de datos de interés, al final de todo el tratado del sistema de información geográfica obtuvimos los archivos en formato Raster:

- Uso de suelo: pastizal y matorral

- Geología: Arenisca-Conglomerado-Basalto
- Relieve: LLanuras, mesetas, valles, lomeríos
- Carreteras: pavimentadas con buffer
- Lineas de transmisión: en torres de acero con buffer
- Edafología: Regosoles y Vertisoles
- Fallas y fracturas: excluye regiones con fallas y fracturas con buffer
- Riesgo volcánico: excluye zonas con registro de cenizas y circunferencia de radio de 30 kilómetros
- Corrientes de agua: excluye corrientes superficiales con buffer
- Humedad: regiones de escasa humedad.

del mismo tamaño y región que las cartas proporcionadas por el INEGI, con una resolución de 3000×3000 pixeles, con una altura de 33 metros y un largo de 66 metros cada pixel (Tamaño de celda). Una vez obtenidos, estos archivos fueron exportados a formato ASC-II, ya que el manejo del cómputo científico es eficiente en él. La zona de estudio aparece en la *Figura 1*. Es importante mencionar que para adoptar la metodología de los pesos de evidencia a nuestro problema en particular, tomamos como región precursora los municipios de Cuautla, Jojutla, Xochitepec y Yecapixtla en una versión y en otra hemos tomado a estos cuatro municipios más Amacuzas, Coatlán del Río, Mazatepec y Zacatepec (Ver división municipal en la *Figura 3 y 4*), con el objetivo de encontrar alguna diferencia sustancial debido a las regiones precursoras propuestas.

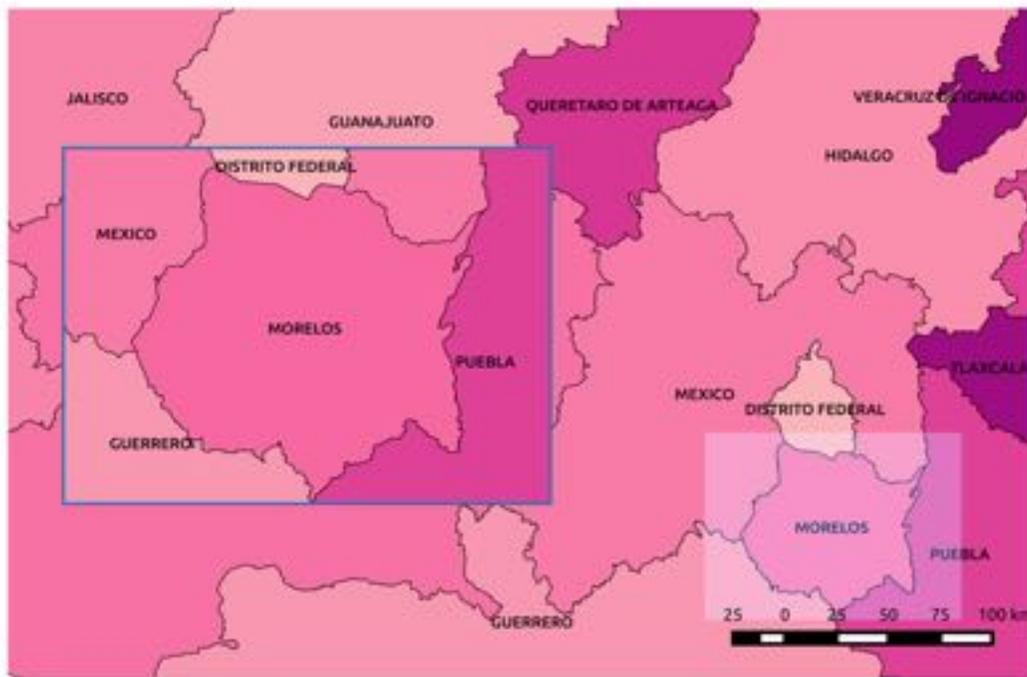


Fig. 1 Región de estudio

A partir de aquí, nuestros procedimientos se llevaron a cabo en el software Mathematica, en donde desarrollamos e implementamos el programa que hace el recorrido por cada una de las celdas, para calcular en ella la probabilidad a posteriori de la fórmula (3). El código fue escrito con el cuidado respectivo a los errores asociados a los métodos numéricos y optimizado de tal manera que podamos tener desempeño y calidad de cálculo. Como resultado del programa se obtiene, también en formato ASC-II, un archivo que contiene los valores de la probabilidad a posteriori para cada celda. Finalmente, el archivo es llevado de regreso a QGIS para su interpretación y superposición con las capas de municipios y límites territoriales.

De la figura 5 a la 14 se muestran las distintas evidencias que utilizamos, después del proceso de selección y minería de datos, están localizadas geográficamente. Cada una de estas capas son las que se convirtieron a un formato de datos manipulable con Mathematica (formato ASCII).

| | |
|----|-----------------|
| 16 | municipio |
| 17 | Amacuzac |
| 16 | Axochiapan |
| 15 | Ayala |
| 14 | Coatlan del Rio |
| 13 | Jantetelco |
| 12 | Jojutla |
| 11 | Jonacatepec |
| 10 | Mazatepec |
| 9 | Miacatlan |
| 8 | Puente de Ixtla |
| 7 | Tepalcingo |
| 6 | Tetecala |
| 5 | Tlaltizapan |
| 4 | Tlaquiterango |
| 3 | Xochitepec |
| 2 | Zacatepec |
| 1 | Temoac |



Fig. 2 Región específica de estudio

| | |
|----|------------|
| id | Propuesta |
| 1 | Cuautila |
| 3 | Xochitepec |
| 2 | Jojutla |
| 4 | Yecapixtla |

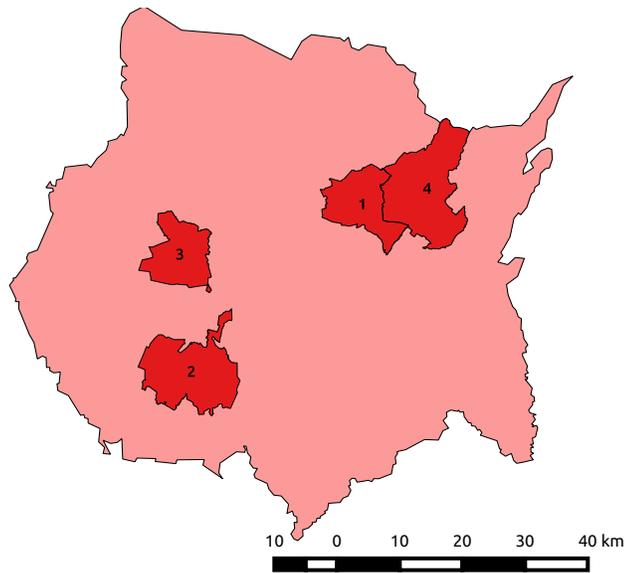


Fig. 3 Cuatro municipios precursores

| | |
|----|----------------|
| 10 | Proquerubá |
| 1 | Aracuzac |
| 2 | Coacán del Río |
| 3 | Cuztla |
| 4 | Asutla |
| 5 | Macatejoc |
| 6 | Xochiltepec |
| 7 | Tecapetitla |
| 8 | Zacatepec |

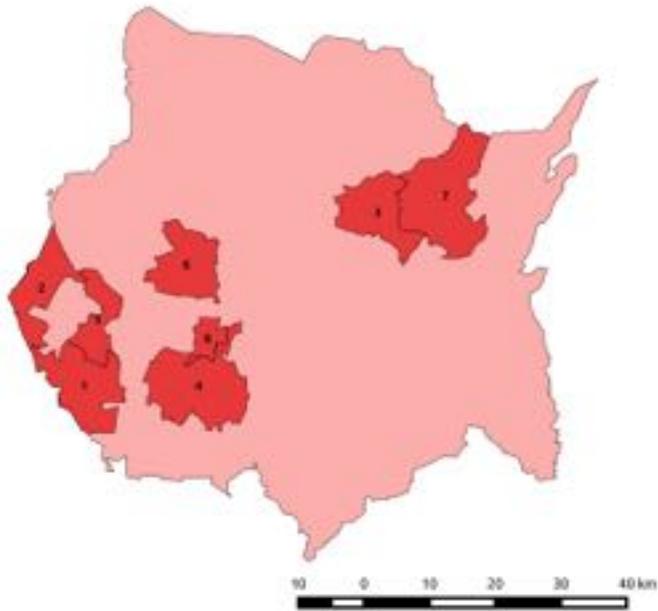


Fig. 4 Ocho municipios precursores

Colores
■ Regosoles y Vertisoles
■ Estado de Morelos

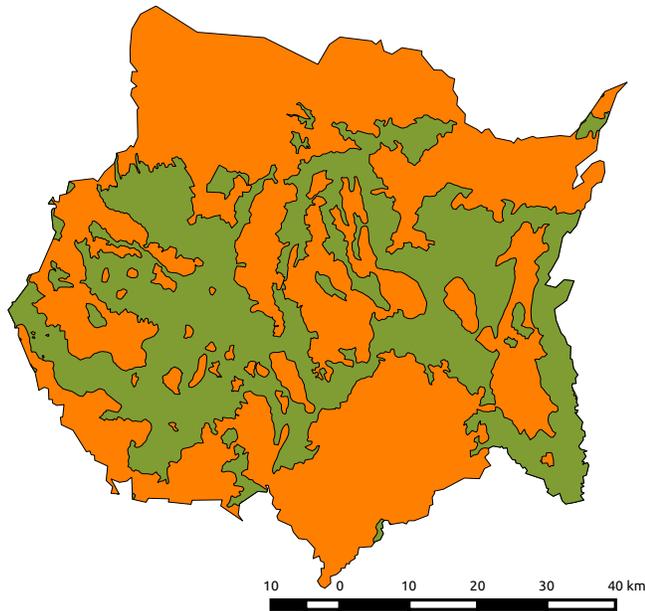


Fig. 5 Edafología importante

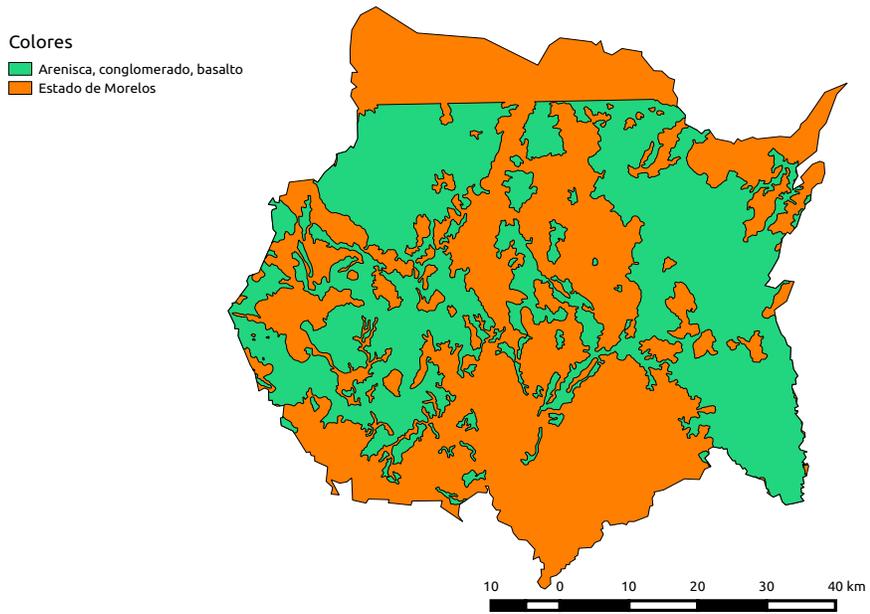


Fig. 6 Geología importante

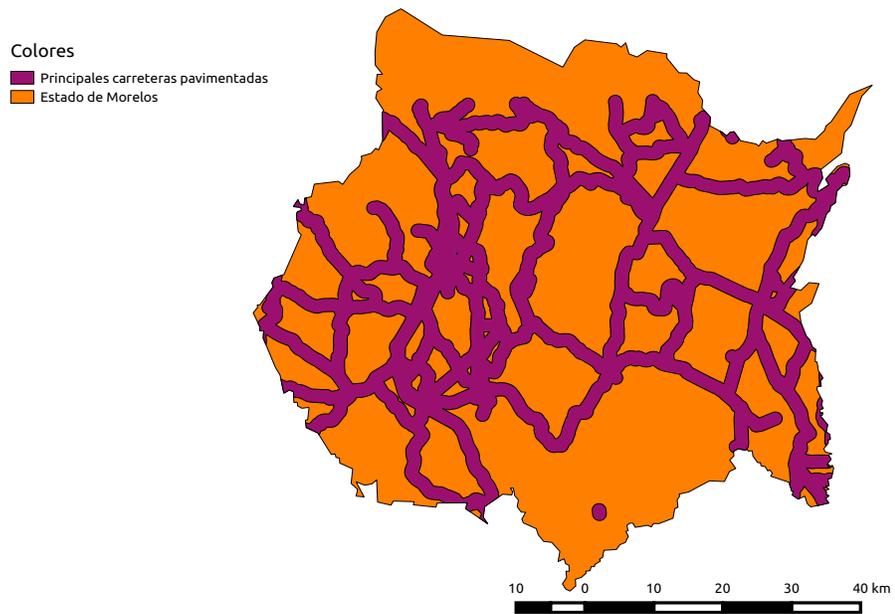


Fig. 7 Carreteras pavimentadas

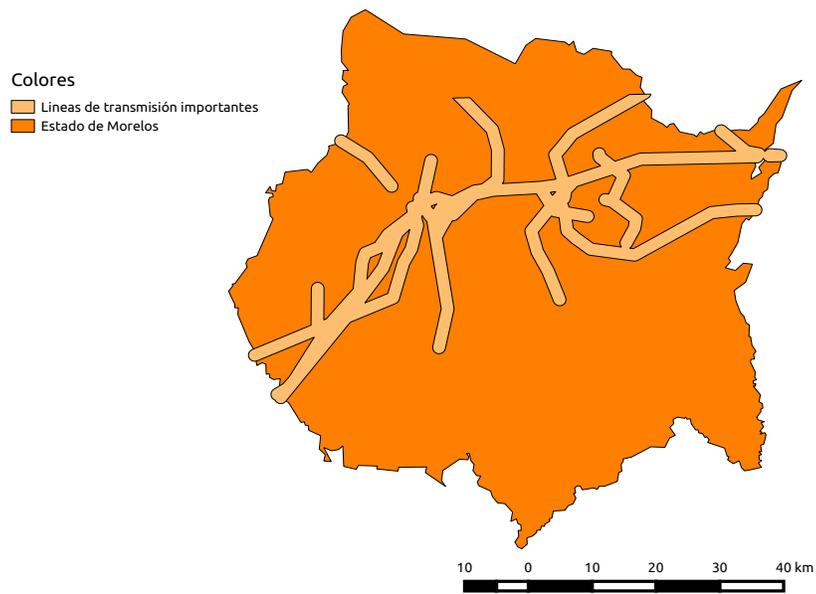


Fig. 8 Líneas de transmisión en torres de acero

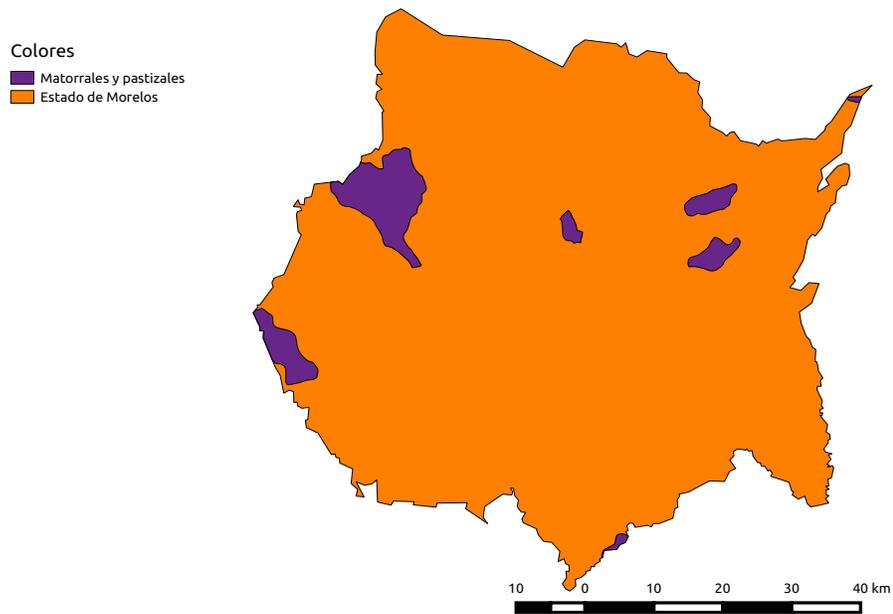


Fig. 9 Uso de suelo sin importancia forestal, agrícola o urbano

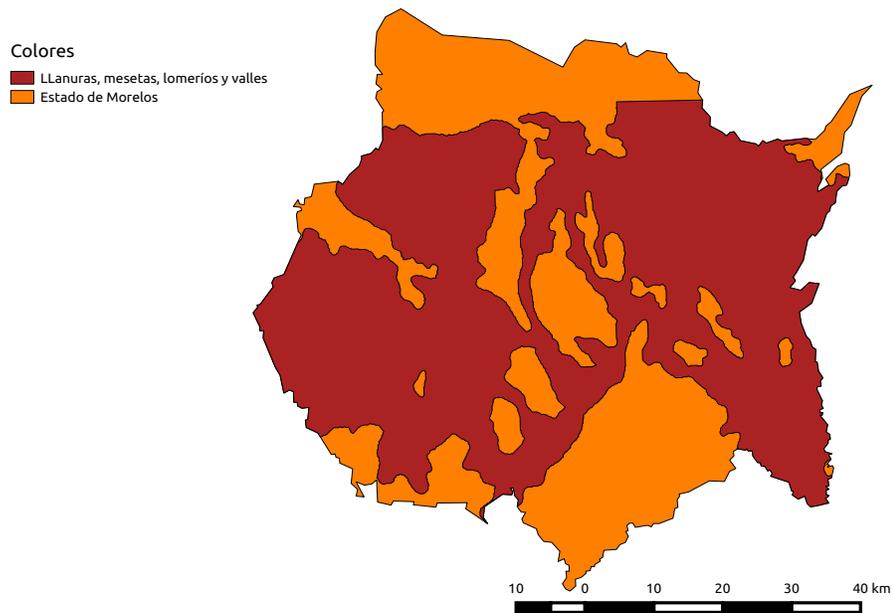


Fig. 10 Relieve adecuado

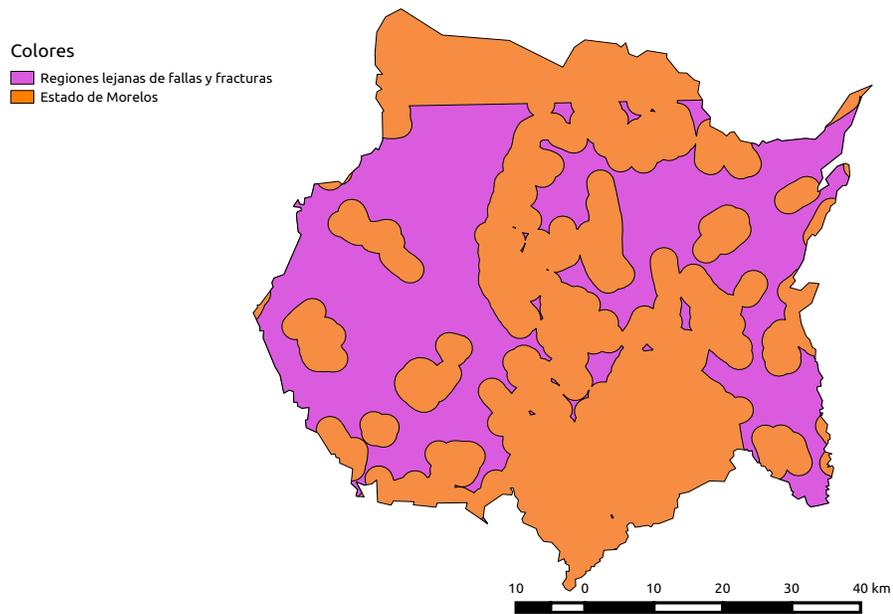


Fig. 11 Regiones lejanas a fallas y fracturas geológicas

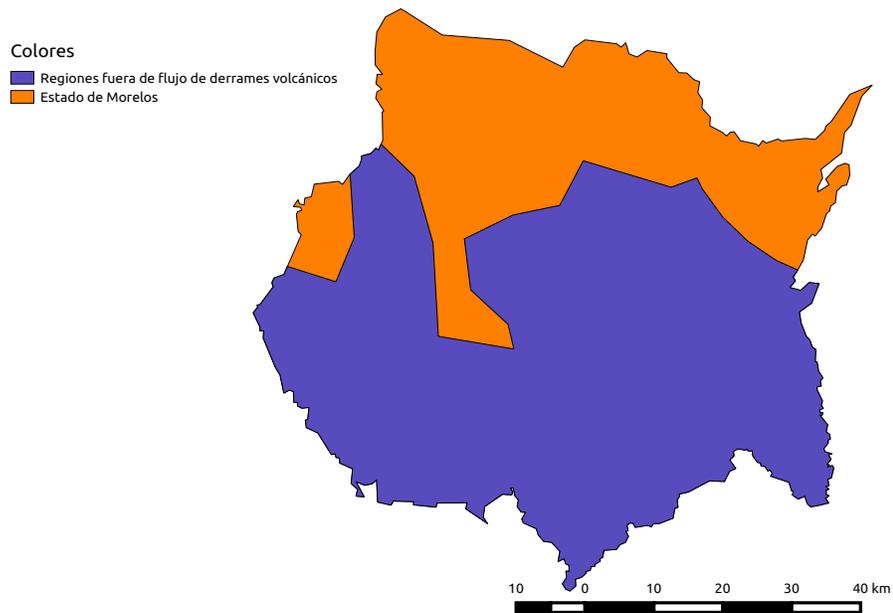


Fig. 12 Regiones retiradas de zonas de riesgo volcánico

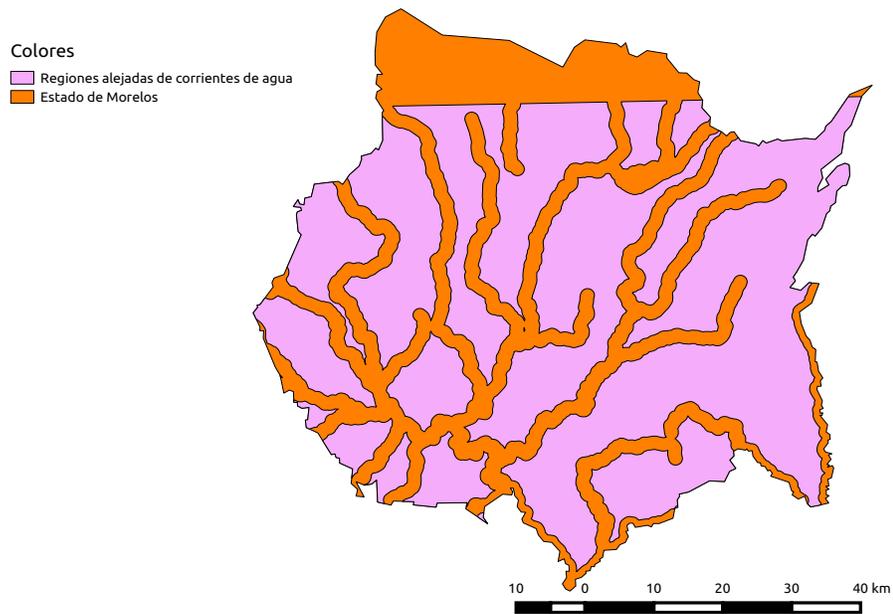


Fig. 13 Regiones retiradas de corrientes de agua superficiales

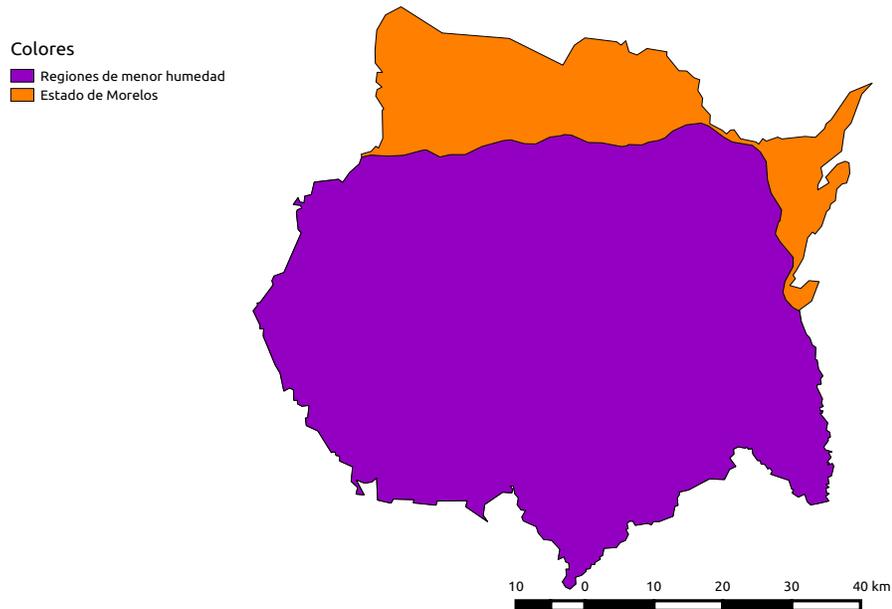


Fig. 14 Regiones de humedad escasa

A la hora de hacer las proyecciones cartográficas tuvimos el suficiente cuidado como para ubicar adecuadamente los cuadros que obtuvimos de Mathematica, pues esto es fundamental a la hora de proponer un resultado coherente.

Para poder presentar una discusión más rica, decidimos ver como es que las probabilidades se modificaban a la hora de escoger menos evidencias. Con esto en mente, dentro de la metodología notamos que la capa de líneas de transmisión es el factor dominante al tener una proporción grande de su área intersectada con nuestras regiones precursoras (tanto con cuatro como con ocho municipios).

De la misma forma las capas de uso de suelo, riesgo volcánico y corrientes de agua presentan una proporción baja de su área intersectada con nuestras regiones precursoras. Por lo tanto hemos generado mapas de probabilidad para:

- Todas las capas juntas
- Todas exceptuando las líneas de transmisión
- Todas menos líneas de transmisión y uso de suelo
- Todas menos líneas de transmisión, uso de suelo y riesgo volcánico

- Todas menos líneas de transmisión, uso de suelo, riesgo volcánico y corrientes de agua

De cualquier manera, presentamos los resultados obtenidos de la figura 15 a la figura 21.

En la figura 15 podemos ver el efecto de la gran proporción de área intersectada de la capa de líneas de transmisión con los municipios precursores, como habíamos anticipado, de ahí que las regiones de alto perfil observadas en esta figura son aproximadas a la capa de líneas de transmisión (forma muy definida). Queda todavía más evidente la fuerte dependencia de la probabilidad con la capa de líneas de transmisión, cuando observamos la figura 16, en la cual ya no se observa patrón alguno o regiones aproximadas a alguna de nuestras capas. Es importante notar que en este paso, Yecapixtla y Cuautla perdieron una gran parte de área con alto perfil.

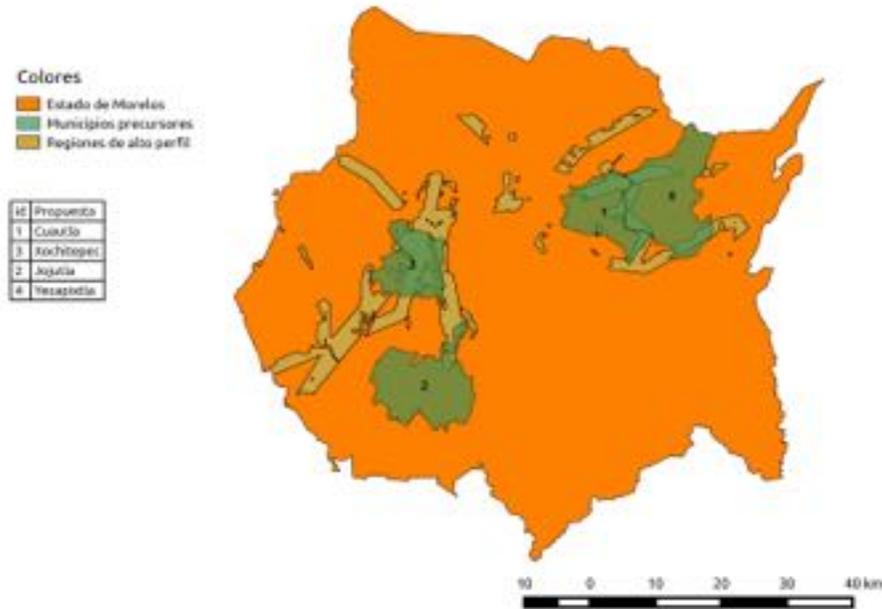


Fig. 15 Predicción con todas las evidencias para cuatro municipios

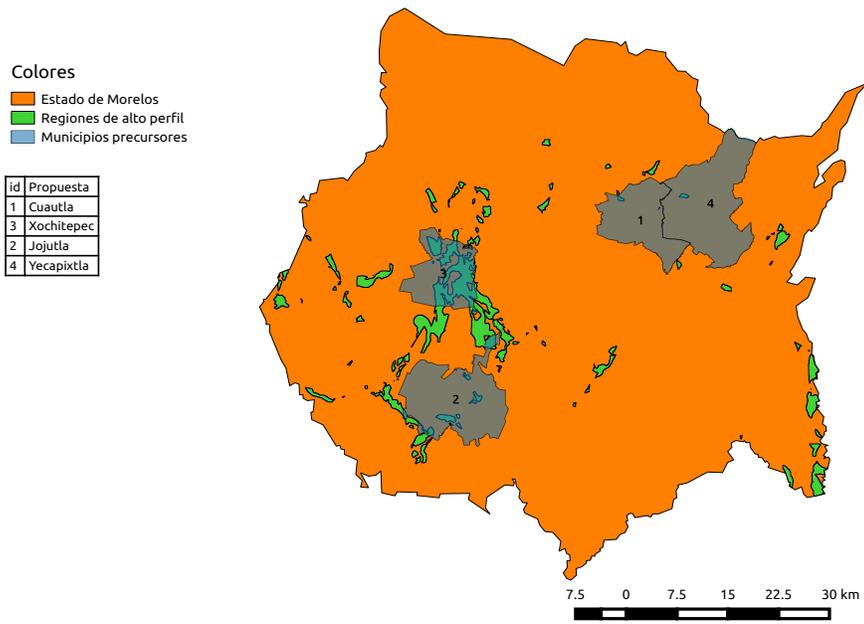


Fig. 16 Predicción con todas las evidencias exceptuando líneas de trasmisión, para cuatro municipios

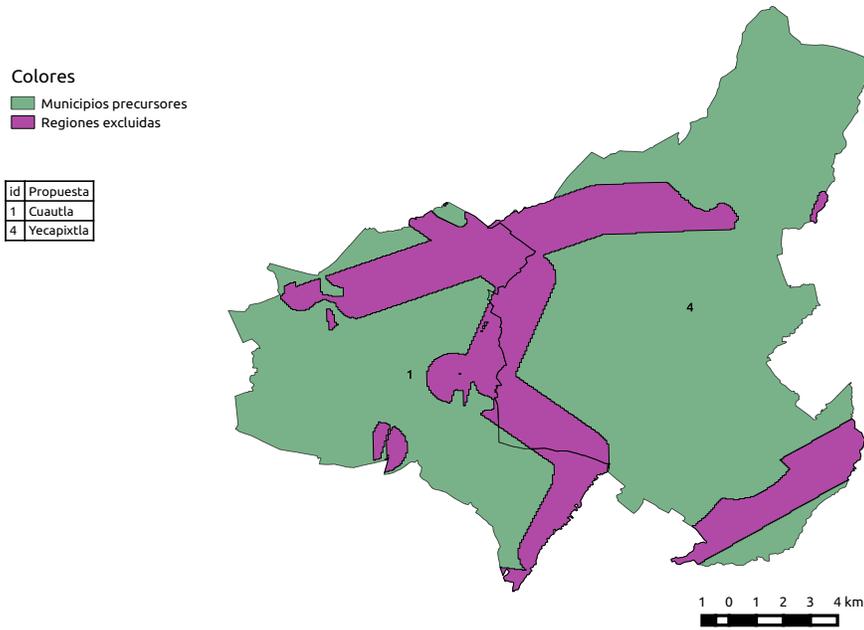


Fig. 16-a Diferencia de área propuesta entre las figuras 15 y 16, para los municipios de Cuautla y Yecapixtla

Si ponemos atención a las figuras 17, 18 y 19, podemos concluir que el cambio en el área con alto perfil propuesta es mínima.

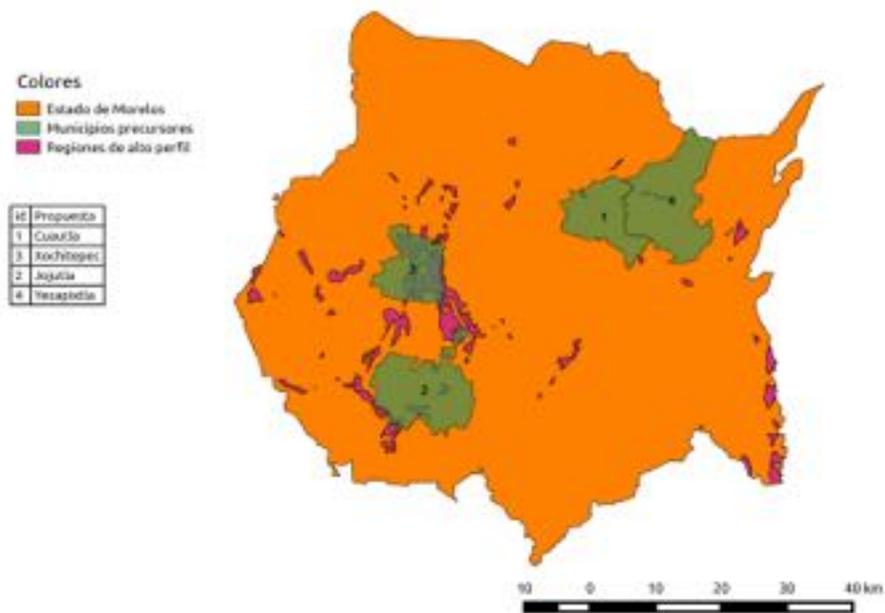


Fig. 17 Predicción con todas las evidencias exceptuando líneas de trasmisión y uso de suelo, para cuatro municipios

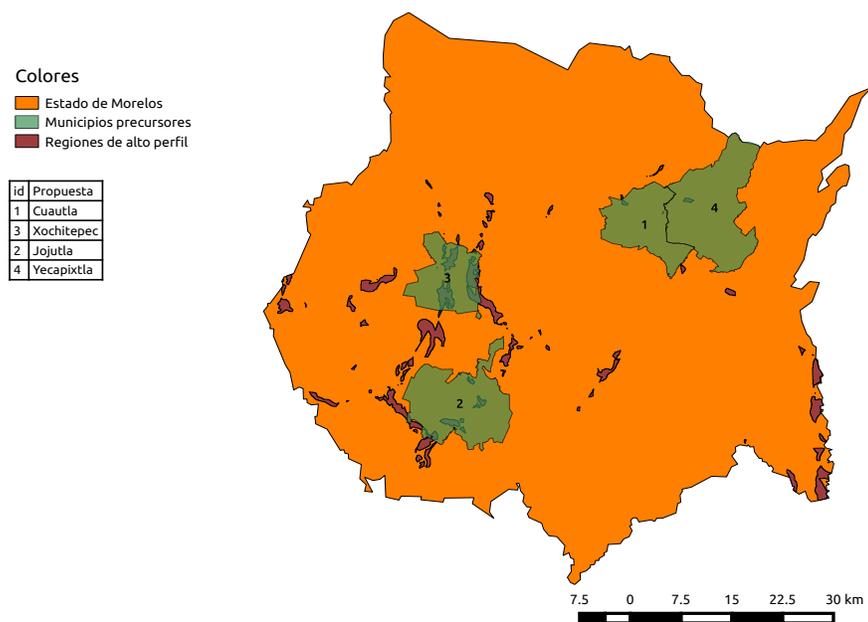


Fig. 18 Predicción con todas las evidencias exceptuando líneas de trasmisión,

uso de suelo y riesgo volcánico, para cuatro municipios

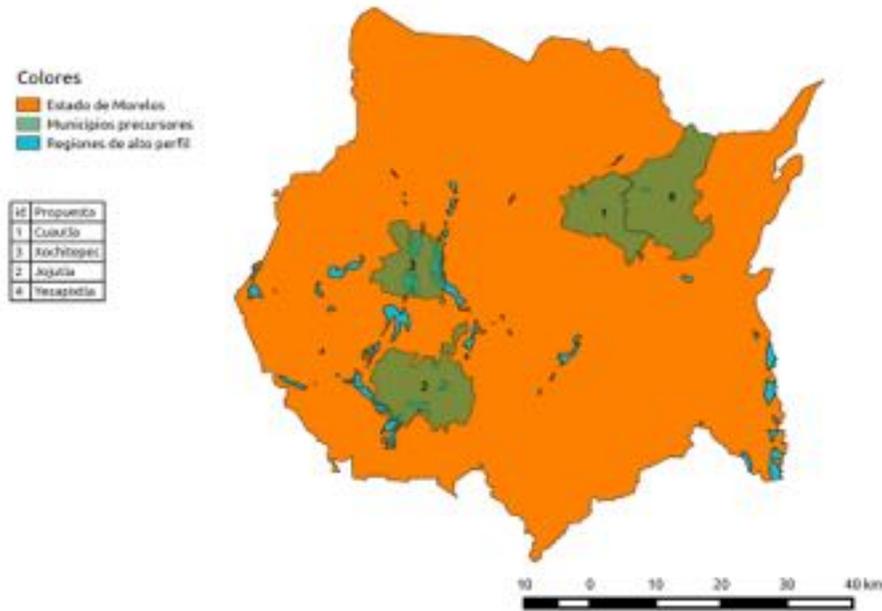


Fig. 19 Predicción con todas las evidencias exceptuando líneas de transmisión, uso de suelo, riesgo volcánico y corrientes superficiales, para cuatro municipios

En las figuras 20 y 21 tomamos ocho municipios precursoras en vez de cuatro, ellas muestran los cálculos hechos para todas las evidencias y y todas las evidencias excepto la capa de líneas de transmisión, respectivamente.

En el caso de la figura 20 se observa un aumento considerable de las regiones de alto perfil en comparación de la figura 15 donde solamente tomamos cuatro municipios precursoras.

Para el caso de la figura 21 observamos que el aumento de las regiones de alto perfil es grande en comparación de la figura 16. En este caso es notoria la dependencia de la elección de regiones precursoras, pues difieren sustancialmente las predicciones de las figuras 16 y 21.

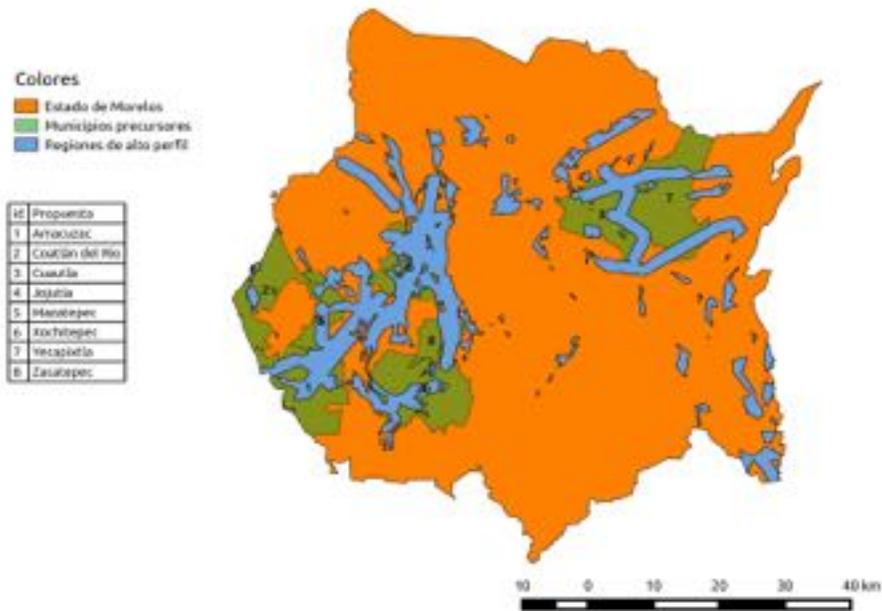


Fig. 20 Predicción con todas las evidencias para ocho municipios

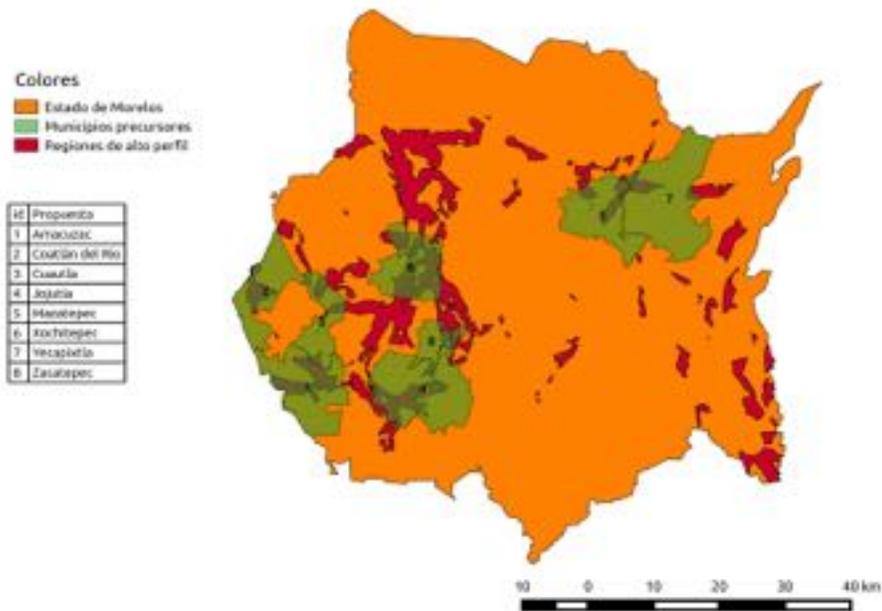


Fig. 21 Predicción con todas las evidencias exceptuando líneas de transmisión, para ocho municipios

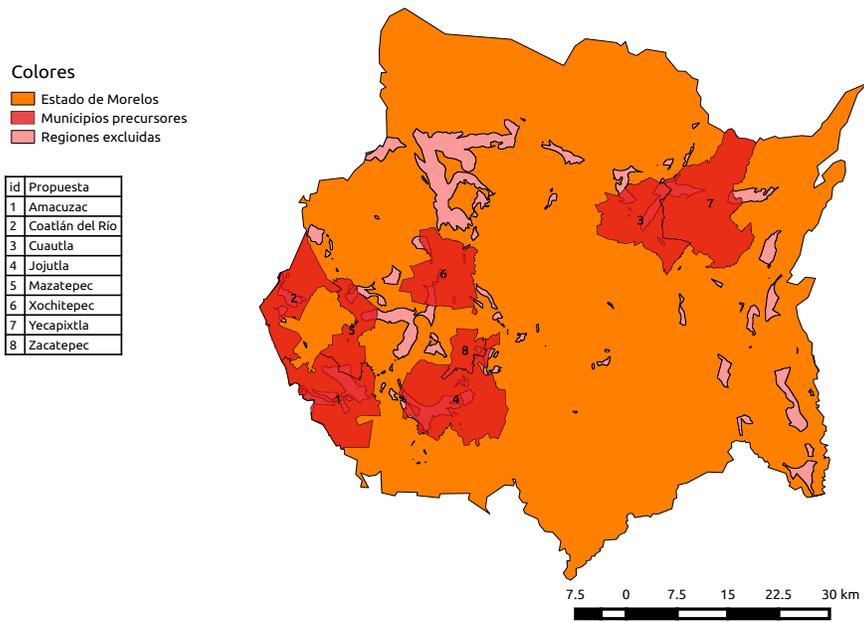


Fig. 21-a Diferencia de área propuesta entre las figuras 16 y 21

Proposición del sitio para el Sincrotrón en Morelos

Las siguientes figuras muestran las regiones que mostraron poca modificación a la hora de variar las capas e incluir más municipios precursores, todas ellas mostradas en dichos municipios.

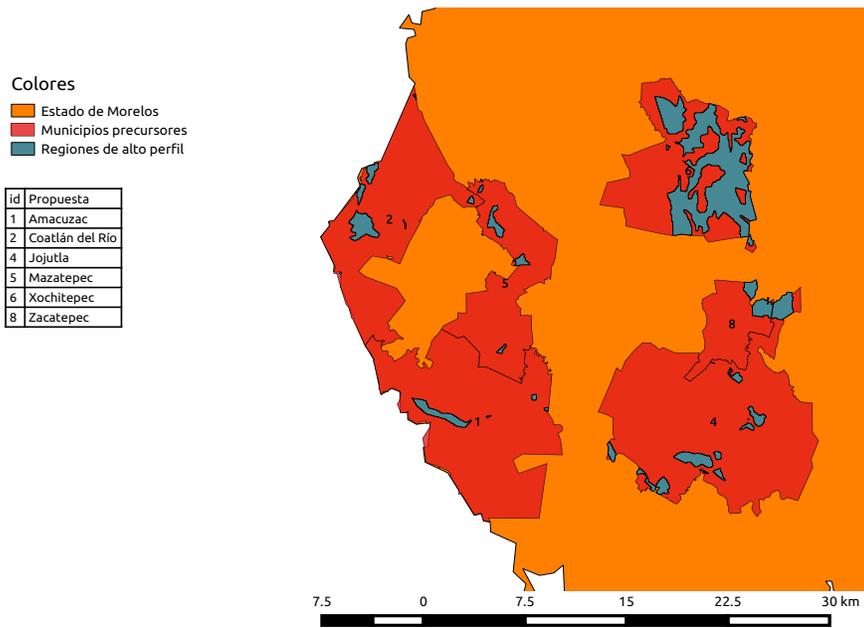


Fig. 22 Regiones de alto perfil para el Sincrotrón

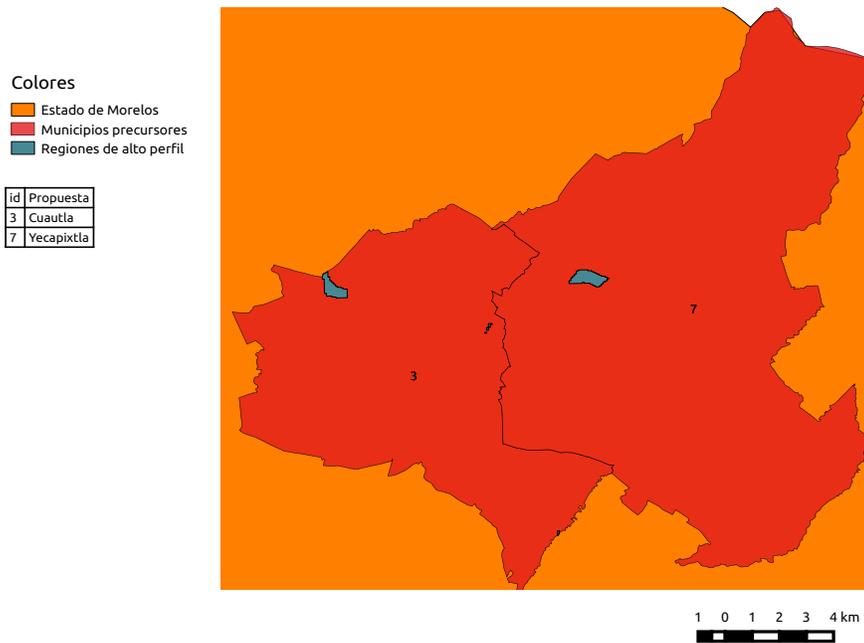


Fig. 23 Regiones de alto perfil para el Sincrotrón

References

- [1] Graeme F. Bonham-Carter, *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier, 2014. Volumen 13 de Computer methods in the geosciences.
- [2] *Brookhaven Energy Limited Partnership, Brookhaven Energy Center Article X Application, Section 13.0 -Soils, Geology and Seismology, July 2001.*
- [3] *The University of the State of New York, The State Education Department, Surficial Geological Map of New York, Compiled And Edited 1989, Lower Hudson Sheet*
- [4] *U.S. Department of Agriculture, NRCS, Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Suffolk Country, New York, ny103*
- [5] *U.S. Department of Agriculture, NRCS, Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Suffolk Country, New York, USDA Soil Conservation Service, April 1975.*
- [6] IUSS Grupo de Trabajo WRB. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera Actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma
- [7] INEGI. *Datos Vectoriales de Carta de Uso del Suelo y Vegetación*. Escala 1:250 000 (Vectorial), 1997. Diccionario de Datos de Uso del Suelo y Vegetación.
- [8] INEGI, Dirección General de Geografía. *Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Aguas Superficiales* Escala 1:250 000, Serie I, 1999. Hidrología de aguas superficiales
- [9] INEGI. *Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1405*. Escala 1:250,000, Serie I.
- [10] INEGI. *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico*. Escala 1:250,000 Serie II, 2007 (Continuo Nacional)
- [11] INEGI. *Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta Topográfica*. Escala 1:250,000 (Continuo Nacional)
- [12] INEGI. *Conjunto de Datos Vectoriales Humedad Suelo*. Escala 1:1,000,000 (Continuo Nacional)

- [13] INEGI. *Conjunto de Datos Vectoriales Subprovincias fisiográficas*. Escala 1:1,000,000 (Continuo Nacional)
- [14] INEGI. *Conjunto de Datos Vectoriales Fallas y fracturas*. Escala 1:1,000,000 (Continuo Nacional)

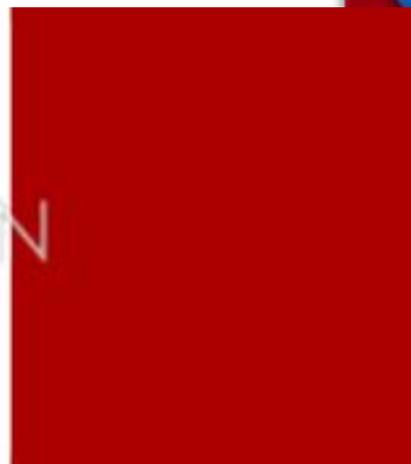


PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Estudio de Potencia Eléctrica del Lugar Seleccionado para el Sincrotrón en Morelos

MCF Héctor Domínguez Sotelo



ESTUDIO DE POTENCIA ELÉCTRICA DEL LUGAR SELECCIONADO PARA EL SINCROTRÓN EN MOREOS

MCF HÉCTOR DOMÍNGUEZ SOTELO





Estudio de potencia eléctrica del lugar seleccionado para el sincrotrón en Morelos.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es ubicar una región dentro del estado de Morelos que asegure la capacidad de suministro de energía eléctrica con eficiencia y calidad en el sitio probable donde se construya el Sincrotrón.

El punto que se elija para la acometida del servicio de suministro de potencia eléctrica debe enlazarse con una red de transmisión de energía que sea confiable y permita integrar y aprovechar eficientemente los recursos de generación instalados en el sistema, manteniendo la disponibilidad y confiabilidad de la red eléctrica de transmisión y transformación.

Generalidades

La calidad de la energía eléctrica consiste en la ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones de las ondas de voltaje y corriente (que se suministran al usuario) producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS. Calidad es referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

El objetivo del estudio es proporcionar una justificación técnica que asegure que el servicio de energía eléctrica pueda operar en condiciones normales y ante contingencias, con las siguientes características:

- La no aparición de sobrecargas en sus elementos componentes
- Que opere dentro de rangos de tensión establecidos
- Sin problemas de estabilidad angular y sin variaciones de frecuencia
- Con capacidad de transferencia de potencia entre regiones para compartir reservas de generación de energía
- Alta confiabilidad de suministro de energía
- Con controles apropiados para la flexibilidad en la operación.

La estabilidad de voltaje es la propiedad del sistema de potencia de permanecer en equilibrio bajo condiciones normales de operación y de recuperar su estado estable



después de una contingencia o falla en alguno de sus componentes. El sistema recuperado debe tener los niveles de voltaje adecuados en la operación.

La no estabilidad de voltaje en un sistema lo puede llevar al colapso de éste, esto es, una secuencia de eventos en cascada que acompañan la inestabilidad de tensión teniendo como consecuencia un bajo nivel de voltaje de suministro en una parte o en la totalidad del sistema eléctrico.

Típicamente el colapso de voltaje está asociado a la transferencia de potencia desde lugares distantes de generación hacia grandes centros de consumo, adicionalmente toma mayor importancia esta problemática debido a aspectos como es la utilización de enlaces existentes entre los componentes del sistema eléctrico de potencia. Esto lleva al sistema a sus límites operativos debido a la falta de construcción de nuevas instalaciones para la transmisión de energía eléctrica debido a factores como son la indisponibilidad de accesos. Mantener niveles de voltaje adecuados de una red con márgenes reducidos es una fuente importante de vulnerabilidad para todos los sistemas que están interconectados.

Para que un sistema eléctrico sea estable y pueda soportar contingencias sin la afectación de voltaje (colapso) es necesario contar con reservas adecuadas de *potencia reactiva*.

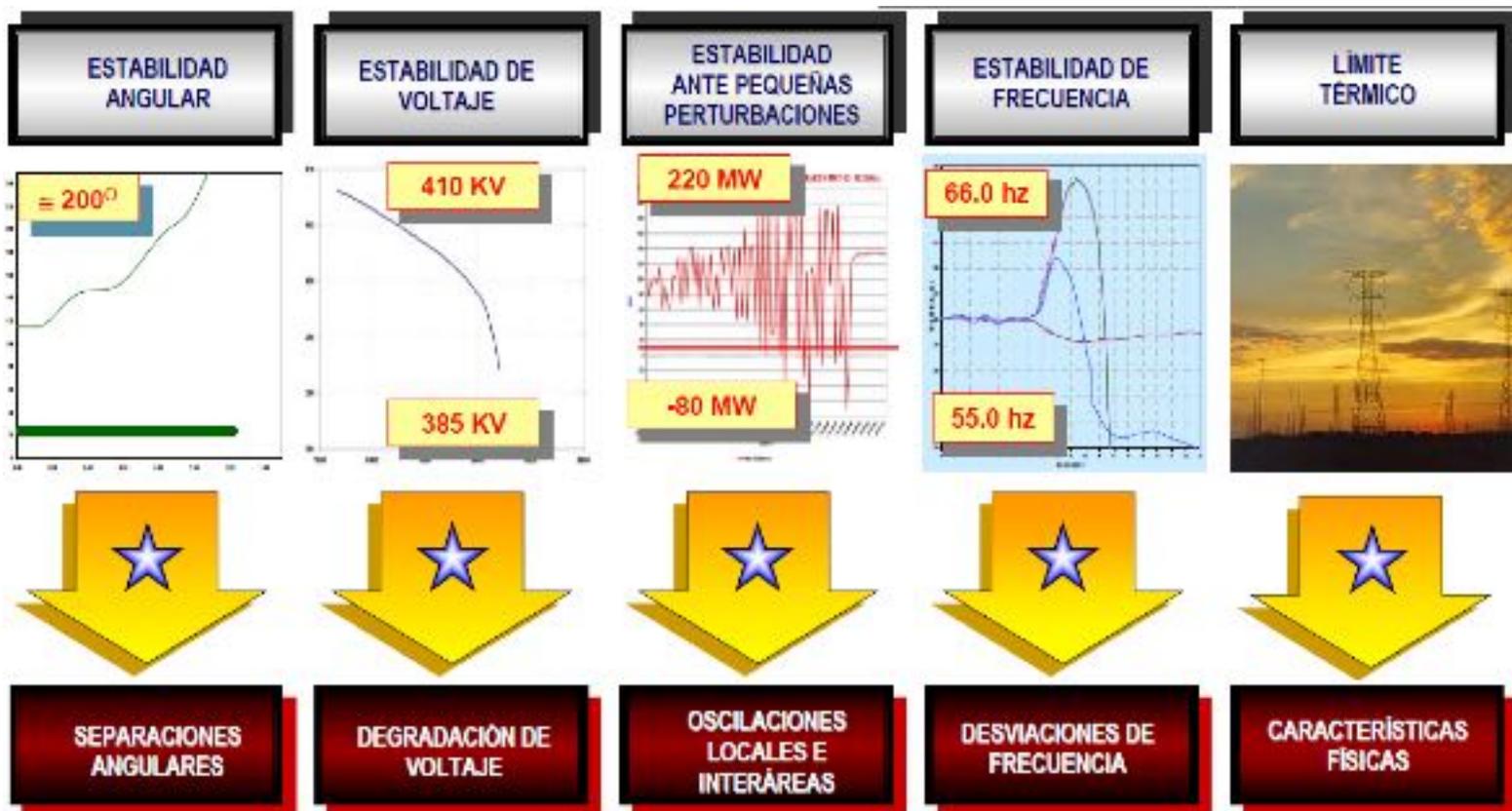
Para lograr nuestra meta y proponer la región factible en el estado de Morelos con la característica de baja vulnerabilidad en el sistema eléctrico, la red candidata será la que tenga las características siguientes:

- Mínima probabilidad de ocurrencia de tener variaciones de voltaje y variaciones de frecuencia,
- Contar con reserva de potencia reactiva,
- Que no contenga señales eléctricas de voltaje y corriente distorsionadas,
- Que no contenga armónicas y tampoco componentes de corriente directa (CD) en la señal de voltaje,
- Un mínimo en las interrupciones del suministro de potencia eléctrica,
- Que tenga alta probabilidad de preservar estas propiedades de confiabilidad y capacidad de suministro de potencia eléctrica por un periodo largo de años.

Como el fluido eléctrico se encuentra circulando en un sistema muy complejo que está interconectado con muchos sistemas y está sujeto a tensión permanente, los retos a enfrentar consisten en un conjunto de problemáticas relevantes en torno a la operatividad del sistema eléctrico de potencia interconectado con las redes eléctricas que

proveen de energía eléctrica al estado de Morelos, en los niveles de voltaje de 400 kV y 230 kV. Estas se muestran en el esquema de abajo.

Esquema que presenta las problemáticas operativas que restringen la capacidad de transmisión de la red eléctrica



¿Qué significan estas problemáticas?

A continuación se explican estos indicadores de calidad de la energía que afectan directamente en la seguridad y confiabilidad de suministro de energía así como en la flexibilidad del sistema eléctrico. Representan los retos de la ingeniería para diseñar un sistema eléctrico que opere en régimen de condiciones estables. Esto servirá de base para elaborar la propuesta bajo estudio.



a) Variaciones en el voltaje

El sobre voltaje (sobretensión) es el incremento de la tensión a un nivel superior al 110% del valor nominal, con duración mayor a un minuto.

Las sobretensiones se generan, usualmente, por la desconexión de grandes cargas instaladas a la red de potencia o por la conexión de bancos de capacitores conectados al sistema. Se presentan comúnmente cuando el sistema no es robusto y no tiene la capacidad de mantener la regulación del voltaje o por un inadecuado control de la tensión.

Caída de voltaje es la reducción del valor R.M.S. de la tensión a menos del 90% del valor nominal, con duración mayor a un minuto. La conexión de una carga importante al sistema o la desconexión de un banco de capacitores de la línea, causan una reducción en la tensión de ésta, hasta que los equipos de regulación operen correctamente para restablecerlo a su valor nominal.

Los circuitos sobrecargados producen una caída de tensión en la acometida de la carga del usuario. La sobretensión y la caída de tensión generalmente no se deben a fallas en el sistema. Son causadas comúnmente por variaciones de la carga u operaciones de conexión y desconexión de grandes cargas u otros dispositivos.

Por otro lado, un desequilibrio de voltajes en un sistema eléctrico, se presenta cuando las magnitudes de las tensiones y/o ángulos entre las tres líneas no son iguales, la desviación máxima respecto al valor promedio de las tensiones de línea, dividida entre el promedio de las tensiones de línea, expresado en porcentaje.

El desbalance también puede analizarse usando componentes simétricas, la relación de la componente de secuencia cero (o la componente de secuencia negativa) entre la componente de secuencia positiva, expresada en por ciento.

Las fuentes más comunes del desequilibrio de tensiones son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierta. Las fallas de aislamiento no detectadas en conductores también desequilibran un sistema trifásico.

Se recomienda que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2%.



Distorsión de la forma de onda

La distorsión de la forma de onda es una desviación estable del comportamiento ideal sinusoidal del voltaje o la corriente, la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Se caracteriza, principalmente por el contenido espectral de la desviación.

Las cinco formas primarias de distorsión de la forma de onda son:

Corrimiento DC

La presencia de una tensión o de una corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia se denomina corrimiento DC (DC offset). Esto ocurre debido al efecto que producen equipos de rectificación de media onda o controladores de equipos incandescentes. Este tipo de controlador está constituido de diodos que reducen el valor R.M.S. de la tensión de alimentación por rectificación de media onda.

Efectos de la presencia de DC en redes de AC: La corriente directa en redes de corriente alterna produce efectos perjudiciales al polarizar los núcleos de los transformadores de forma que se saturan en operación normal causando el calentamiento y la pérdida de vida útil en estos equipos. La corriente directa es una causa potencial del aumento de la corrosión en componentes de equipos de alta y baja tensión.

Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema (para nuestro país es 60 Hz).

Para un estudio eléctrico las formas de onda distorsionadas se descomponen, usando Fourier, en sus componentes armónicas.

La distorsión armónica tiene origen en el comportamiento no lineal del voltaje de cargas conectadas al sistema de potencia.

El nivel de distorsión armónica se describe por su magnitud y ángulo de fase de cada componente armónica individual. Es común, además, utilizar el criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión de la onda. *Efectos dañinos:* las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes



instantáneas, asociadas con las diferentes corrientes armónicas, causan vibraciones y ruido acústico en transformadores, reactores y máquinas rotatorias.

Causan interferencias en los sistemas de telecomunicaciones y en los circuitos de control.

Provocan una disminución en el factor de potencia.

Están asociadas con el calentamiento de condensadores.

Pueden provocar ferro-resonancia, y elevación de temperatura debido al aumento de pérdidas en transformadores y máquinas rotatorias.

La presencia de armónicos en un sistema de potencia incrementa la corriente provocando un aumento en la temperatura del conductor y pérdidas en los mismos

En conclusión la presencia de armónicos en la red causan sobrecargas en transformadores, máquinas y cables del sistema eléctrico.

Los armónicos de tensión pueden provocar daños en los sistemas electrónicos.

La mitigación de los efectos dañinos, para la red eléctrica, producidos por los armónicos se lleva a cabo monitoreando constantemente los sistemas eléctricos para detectar su presencia y eliminarlos con filtros de armónicas.

Interarmónicos

Los interarmónicos son tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema. Los interarmónicos se pueden encontrar en las redes eléctricas en todos los niveles de tensión.

Las principales fuentes de interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclo convertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de soldadura o calentamiento (hornos) por arco eléctrico. Sus efectos son, similares a los producidos por los armónicos, calentamiento en componentes de las máquinas y equipos conectados a la red eléctrica.

Debido a que los interarmónicos son fuentes de fluctuaciones de tensión, se presenta alto riesgo de la generación de los llamados “flicker” que son variaciones de las formas de onda del voltaje. La mitigación de los efectos de los interarmónicos se realiza con filtros pasivos.

Muestras de tensión

Las muescas son perturbaciones periódicas de la onda de voltaje (se les conoce también como hendiduras), y son causadas por la operación de dispositivos de electrónica de potencia en condiciones normales, y aparecen cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.

Debido a que se presentan de forma continua, se les caracteriza por el espectro de armónicos de la onda de tensión afectada.

Se les considera un caso especial ya que los componentes de frecuencia asociados a ellas pueden ser tan elevados que no se pueden detectar con facilidad con equipos de medición comunes empleados para el análisis de armónicos.

La eliminación de las muescas de tensión implica el aislamiento de la fuente que las está produciendo. También, la inserción de reactancias inductivas es una solución para mitigar el efecto de las muescas.

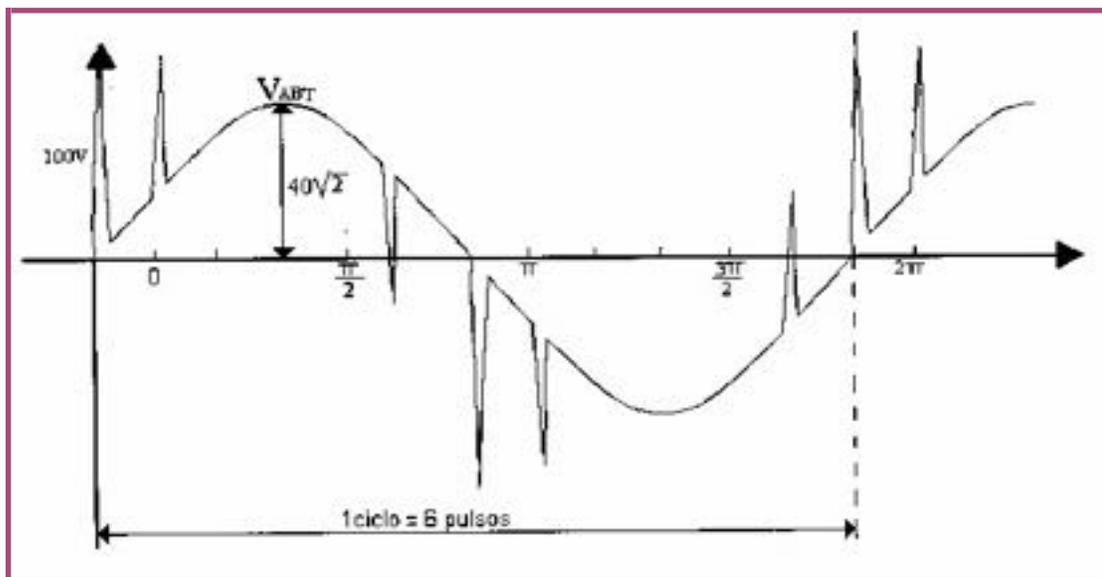


Figura 1. Muestras de Tensión (Notching).

En la figura 1 se pueden apreciar las muescas hendiduras en una onda de voltaje.

Ruido

El ruido es una señal eléctrica no deseada con un contenido espectral inferior a 200 kHz, se superpone a la tensión o a la corriente del sistema tanto en las

fases o en los neutros. Es producido por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas. Una de las causas más frecuente de ruidos son los generadores de emergencia baratos de baja calidad donde se manifiesta el efecto de las ranuras en la forma de onda del voltaje de salida.

Fluctuaciones de voltaje

Las fluctuaciones de tensión son variaciones de la envolvente de la tensión, o también son una serie de cambios aleatorios del voltaje con magnitud que no excede normalmente los rangos de tensión especificados por la norma ANSI C84.1. Las cargas con variaciones rápidas y continuas de la magnitud de la corriente causan variaciones de la tensión que son frecuentemente llamadas “flicker”. Una de las causas más comunes de las fluctuaciones de tensión en los sistemas de transmisión y distribución son los hornos de arco. En otros sistemas menos robustos las fluctuaciones se deben a la presencia de equipos de soldadura por arco y cargas similares.

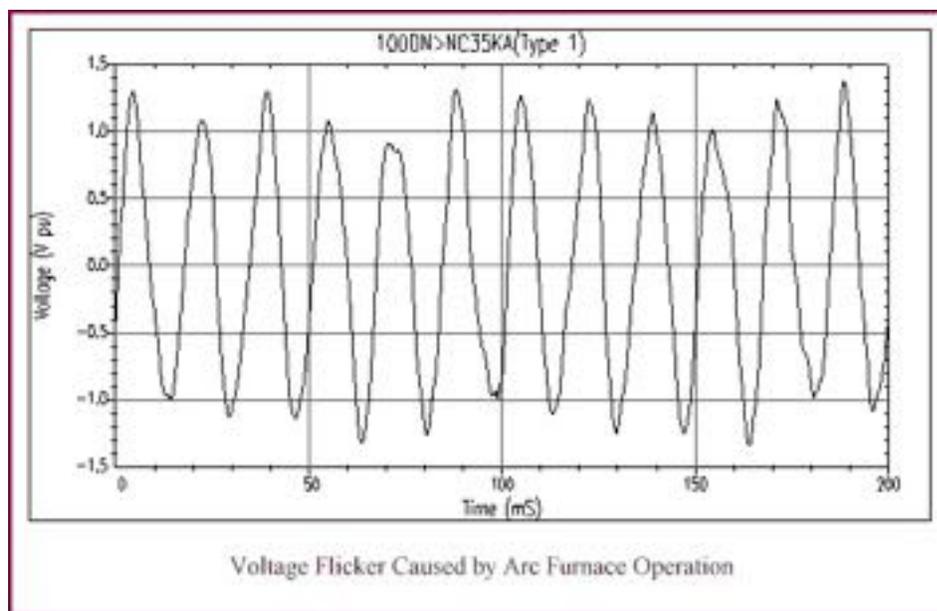


Figura 2. Ejemplo de voltaje flicker generado por horno de arco eléctrico

La señal de voltaje, flicker se define por su magnitud RMS que se expresa en porciento del voltaje nominal de línea. Magnitudes del orden de 0.5% y con frecuencia de 6 a 8 Hz se pueden percibir.



Fenómenos de naturaleza electromagnética

En la actualidad es necesario tomar en consideración un conjunto amplio de indicadores de calidad de la energía eléctrica, debido a sus efectos sobre el confort, la confiabilidad, el costo, el consumo, la demanda y el diseño de los sistemas de suministro eléctrico.

10

Según la Norma IEEE Estándar 1159 los fenómenos electromagnéticos pueden ser de tres tipos: variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente, perturbaciones de carácter transitorio, deformaciones en la forma de onda.

Variaciones de Frecuencia

Un tema importante en la seguridad y calidad de la energía eléctrica es la capacidad que tiene un sistema eléctrico para regular la frecuencia ante eventos que provoquen desviaciones significativas como son: la salida no programada de alguna unidad o planta generadora de capacidad importante, o la pérdida de uno o varios consumidores de alto impacto en el Sistema Interconectado Nacional. Por lo cual, se debe estar evaluando continuamente el estatismo de todos los generadores conectados al sistema y tomar acciones que aseguren la correcta respuesta de los mismos para mantener un Bias de frecuencia aceptable (valor normalmente expresado en Megawatts por deciHertz MW/0,10 Hz), que representa la característica natural del sistema de desviación de frecuencia ante cambios de carga o generación.

El estatismo o por ciento de regulación ($1/R$) de un generador se calcula como la relación de cambio de su frecuencia sobre el cambio de su potencia activa. En conclusión, el control de la frecuencia depende del balance completo de la potencia activa en el sistema.

Es oportuno definir los siguientes términos para el bien de esta causa: *Factor de potencia*: es una medida de la capacidad de un sistema, conectado a un sistema de alimentación de potencia eléctrica, de convertir la potencia activa en trabajo. La absorción o generación de potencia reactiva en el sistema o componente eléctrico modifica el factor de potencia del usuario.

La corrección del factor de potencia es importante para disminuir pérdidas en la red de alimentación de electricidad, evitar las caídas de voltaje y liberar la capacidad de operación de la línea de alimentación y de los transformadores.



Al corregir el factor de potencia se disminuye considerablemente el consumo de la corriente eléctrica que una carga demanda de la línea del servicio de suministro de energía eléctrica, reduciendo el consumo de potencia.

Potencia Reactiva: Es una medida de la capacidad de un equipo requerido (compensador de potencia reactiva) para que la corriente y el voltaje estén en fase.

La potencia reactiva establece los campos magnéticos requeridos para la operación de equipos: transformadores, motores, válvulas, relevadores, etc. Los equipos consumen reactivos.

La potencia reactiva produce campos eléctricos para generación de voltaje, como en las líneas de transmisión. La línea genera reactivos.

Control de voltaje y potencia reactiva

La operación eficiente y confiable de un sistema de potencia implica el control sobre el voltaje y la potencia reactiva.

La potencia reactiva es utilizada por los equipos para establecer los campos electromagnéticos en sus componentes y puedan realizar su función.

El voltaje y la potencia reactiva tienen un significativo impacto en la estabilidad del sistema.

El control de voltaje no es fácil, es complicado por el hecho que el sistema de potencia supe de energía a un vasto número de cargas. La variación de la carga genera variación en la potencia reactiva. La potencia reactiva no puede ser transmitida a grandes distancias, así que el control de voltaje ha de ser efectuado por dispositivos especiales dispersos a través del sistema. Las líneas de transmisión aéreas absorben o entregan potencia reactiva dependiendo de la corriente de carga.

Si la carga de la línea está por abajo de la carga natural las líneas producen potencia reactiva; a cargas por arriba de la carga natural las líneas absorben potencia reactiva. Los transformadores siempre absorben potencia reactiva independientemente de su condición de operación.

Las cargas normalmente absorben potencia reactiva. Tanto la potencia activa como la potencia reactiva de una carga compuesta varían como una función de la magnitud del voltaje. Cargas con un factor de potencia bajo causa una excesiva caída de tensión en la red de transmisión. Dispositivos de compensación se agregan a las



redes para suplir o absorber potencia reactiva y de este modo controlar el balance de potencia reactiva de manera deseada.

Metodología para el control de voltaje

El control del nivel de voltaje está acompañado del control de la producción y absorción así como del flujo de potencia reactiva en todos los niveles del sistema de potencia. Los reguladores automáticos de voltaje controlan la excitación de campo de los generadores para mantener el nivel de voltaje programado en las terminales del generador.

12

Para controlar el voltaje a través del sistema se requieren medios adicionales como son:

- a) Fuentes o sumideros de potencia reactiva: capacitores shunt, reactores shunt, condensadores sincrónicos, *compensadores estáticos de vars* (CEVs).
- b) Compensadores de reactancia de línea, como capacitores conectados en serie en las líneas de transmisión (compensación serie).
- c) Transformadores reguladores.

Los capacitores y reactores shunt, así como los capacitores serie en las líneas de transmisión proveen una compensación *pasiva*, esto es: contribuyen al control del voltaje por la modificación de las características de la red. Proveen potencia reactiva a la red que se conectan.

Pueden estar conectados permanentemente al sistema de transmisión y de distribución o switcheados.

Los condensadores sincrónicos y los CEVs proveen compensación *activa*, la potencia activa absorbida/producida es ajustada automáticamente para mantener el voltaje estable en las barras a las que están conectados.

Los CEVs y los condensadores sincrónicos juntos con las unidades de generación establecen los voltajes en puntos específicos de la red del sistema eléctrico.

Los CEVs tienen la habilidad de proveer un control rápido y continuo de la potencia reactiva y el voltaje, y pueden mejorar algunos aspectos de los sistemas de transmisión:

- Control de sobretensiones temporales
- Prevención de colapso de voltaje

- Mejora de la estabilidad transitoria
- Mejora del amortiguamiento de oscilaciones de potencia
- En niveles de subtransmisión balancean sistemas trifásicos de sistemas que alimentan cargas desbalanceadas.
- Minimizan fluctuaciones en la fuente de voltaje.
- El CEV regula el flujo de reactivos entre enlaces (nodo)

Los capacitores serie se conectan en serie con los conductores de las líneas de transmisión para compensar los reactivos de la línea y mejorar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica, mejorando el factor de potencia.

Sin embargo, esto puede traer consecuencias, si hay regulación del voltaje en la línea a través de una alta compensación serie se corre el riesgo de tener una resonancia subsincrona, igualación de la frecuencia de rotación de los ejes de las turbinas de generadores con la frecuencia del voltaje de línea, esto provocaría una catástrofe en el generador. Bajo ciertas condiciones de operación de la línea de transmisión el efecto del capacitor serie puede ser dañino para el sistema y lo puede llevar al colapso del voltaje.

Se han abordado las diferentes problemáticas involucradas en la transmisión y transformación de la potencia eléctrica, que representan los indicadores de la calidad de la energía asociada a una red de potencia eléctrica. Este panorama nos será de gran beneficio en ser selectivos para decidir cuál red, del sistema eléctrico nacional, que tenga conexión con el estado de Morelos cuenta con las características de nuestra demanda de energía eléctrica

Para tener una visión amplia de la distribución de potencia eléctrica en el país se muestra a continuación la infraestructura del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Su estructura es un sistema interconectado en alta tensión en nivel de voltaje de 400 kV que va de las fuentes generadoras remotas (y locales) a las subestaciones de potencia de los centros de consumo (cargas o usuarios), siendo las líneas de transmisión el enlace.

Nuestro interés radica en tener claro la estructura y los componentes de la red eléctrica a la que las líneas de transporte de electricidad, que proveen energía al estado de Morelos, están conectadas y realizar un análisis de sus características de calidad, confiabilidad, flexibilidad, factibilidad de servicio y capacidad de suministro de energía. Con ello se elabora un diagnóstico que permitirá elegir la región más factible en el Estado que satisfaga nuestras demandas de calidad de energía eléctrica para el Sincrotrón mexicano.

SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

El Sistema Eléctrico Nacional mexicano posee una infraestructura de generación integrada por 215 centrales, con 1,081 unidades de generación. En conjunto, una capacidad instalada de 54,374.7 Megawatts (MW) hasta el año 2014. Esta capacidad estaba integrada por: 40,123.9 MW de centrales operadas por la Subdirección de Generación (SDG); 1,400 MW de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde; y 12,850.8 MW de 28 centrales de Productores Independientes de Energía (PIE), estos datos se muestran en Tabla 1.

| Generador | Tipo de tecnología | Capacidad efectiva (MW) | | Número de Centrales y de Unidades en 2014 | | Participación porcentual por tecnología | Variación 2013-2014 (%) |
|---|---------------------------|-------------------------|-----------------|---|--------------|---|-------------------------|
| | | 2013 | 2014 | Centrales | Unidades | | |
| CFE | Hidroeléctrica | 11,266.8 | 12,268.8 | 80 | 218 | 22.6 | 8.9 |
| | Vapor (combustóleo y gas) | 11,696.6 | 11,398.6 | 26 | 89* | 21.0 | -2.6 |
| | Ciclo combinado | 7,420.3 | 7,566.6 | 13 | 68 | 13.9 | 2 |
| | Carboeléctrica | 5,378.4 | 5,378.4 | 3 | 15 | 9.9 | - |
| | Turbogás | 1,510.4 | 2,303.4 | 46 | 110 | 4.2 | 52.5 |
| | Geotermoelectrica | 823.4 | 813.4 | 4 | 38 | 1.5 | -1.2 |
| | Combustión interna | 259.2 | 302.4 | 9 | 78 | 0.6 | 16.7 |
| | Eoloelectrica | 86.8 | 86.3 | 3 | 8 | 0.2 | - |
| | Solar fotovoltaica | 6.0 | 6.0 | 2 | 2 | < 0.1 | - |
| | Nucleoeléctrica** | 1,400.0 | 1,400.0 | 1 | 2 | 2.6 | - |
| Total CFE | - | 39,849.9 | 41,523.9 | 187 | 628 | 75.4 | 4.3 |
| Productores Independientes de Energía (PIE) | Ciclo Combinado | 12,339.9 | 12,339.9 | 23 | 77 | 22.7 | - |
| | Eoloelectrica | 510.9 | 510.9 | 5 | 376 | 0.9 | - |
| Total PIE | - | 12,850.8 | 12,850.8 | 28 | 453 | 23.6 | - |
| Total | | 52,700.7 | 54,374.7 | 215 | 1,081 | 100 | 3.2 |

Tabla 1. Capacidades de generación de energía eléctrica y los diversos tipos de tecnologías asociadas.

En el año 2014 la capacidad efectiva de generación en el país aumentó 1,674.1 MW. En la región de interés, para este estudio, la adición de capacidad es: 40 MW de la central hidroeléctrica Infiernillo (Guerrero y Michoacán), a partir del 1 de marzo de 2014, 554 MW de la región Valle de México, (Turbo gas en comodato), 242 MW de la región Valle de México (Hidroeléctricas en comodato).

Para la transmisión de energía eléctrica desde las fuentes de generación hasta las plantas transformadoras de potencia eléctrica el SEN cuenta con 22 500 km en líneas de 400 kV, 26 700 km en líneas de 230 kV, 46 000 km en líneas de 161-115 kV.

La integración del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) tiene como propósito mantener la continuidad y la calidad del suministro de energía eléctrica con criterios de suficiencia, competitividad y sustentabilidad para satisfacer las demandas de usuarios y contribuir al desarrollo tecnológico del país. Las principales fuentes de generación en el país están ubicadas en áreas clasificadas como: Central, Oriental, Occidental, Noroeste, Norte, Noreste, Baja California, Baja California Sur, Peninsular. Su localización y sus límites en la República Mexicana se muestran en figura 1.



Figura 3. Áreas de control y regiones de generación de energía eléctrica en la República Mexicana. No incluye 1400 MW de Laguna Verde, ni Productores Independientes de Energía.

El Área de Control Central (ACC) tiene como responsabilidad el suministro de energía eléctrica a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Estado de México así como los estados de Hidalgo, Puebla, Morelos, Guerrero, y Michoacán (Figura 2

La demanda eléctrica de la ZMVM era atendida por la ahora extinta compañía Luz y Fuerza del Centro (LyFC) con un consumo aproximado de 90% total en el Área Central. El 10% restante de la demanda está compuesto por las zonas eléctricas Valle de Bravo, Atlacomulco, Altamirano, Zitácuaro y Ixmiquilpan.

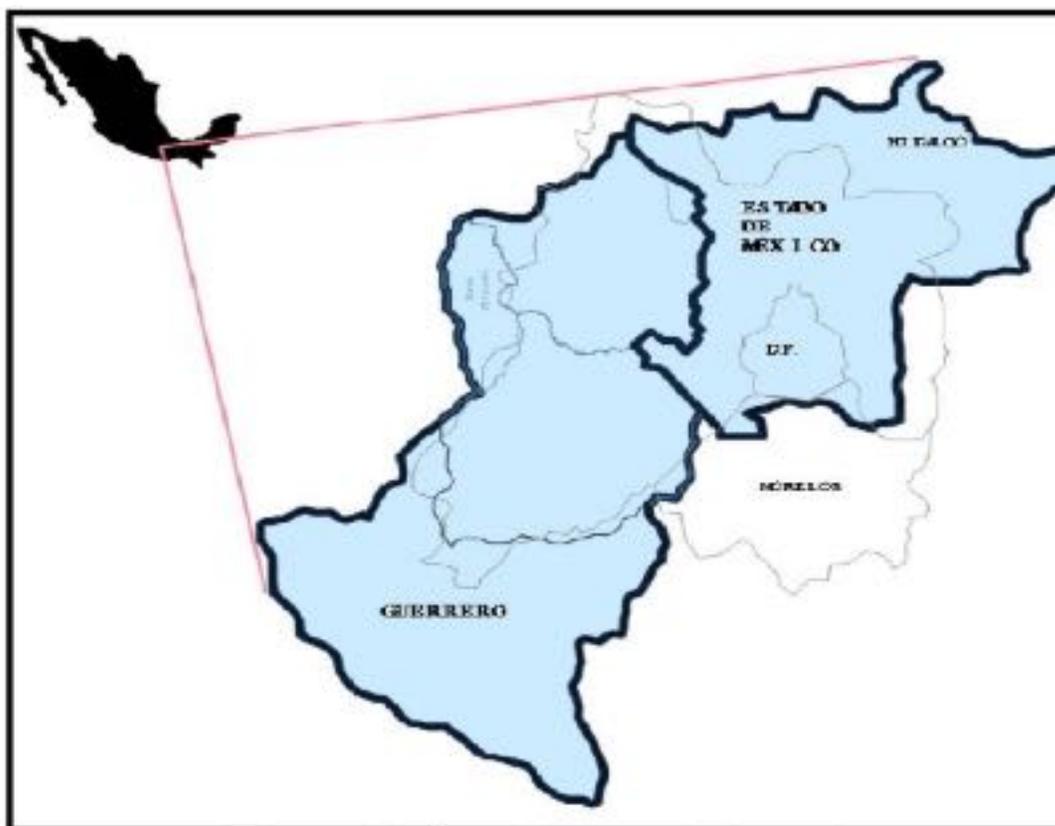


Figura 4. Región de varios estados del país que controla el Área de Control Central (ACC)

La figura 2 muestra la zona de influencia ACC, para el suministro de energía en la ZMVM fue definida como el área geográfica que atendía Luz y Fuerza del Centro, y ahora la Comisión Federal de Electricidad es la entidad designada como la responsable del suministro y operación. La zona comprende el Distrito Federal y parte de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Morelos.

Las fuentes de generación lejana y cercana para la zona central, se conectan por medio de una red en anillo de doble circuito en 400 kV, este se ilustra en la figura 3.

RED TRONCAL DEL SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

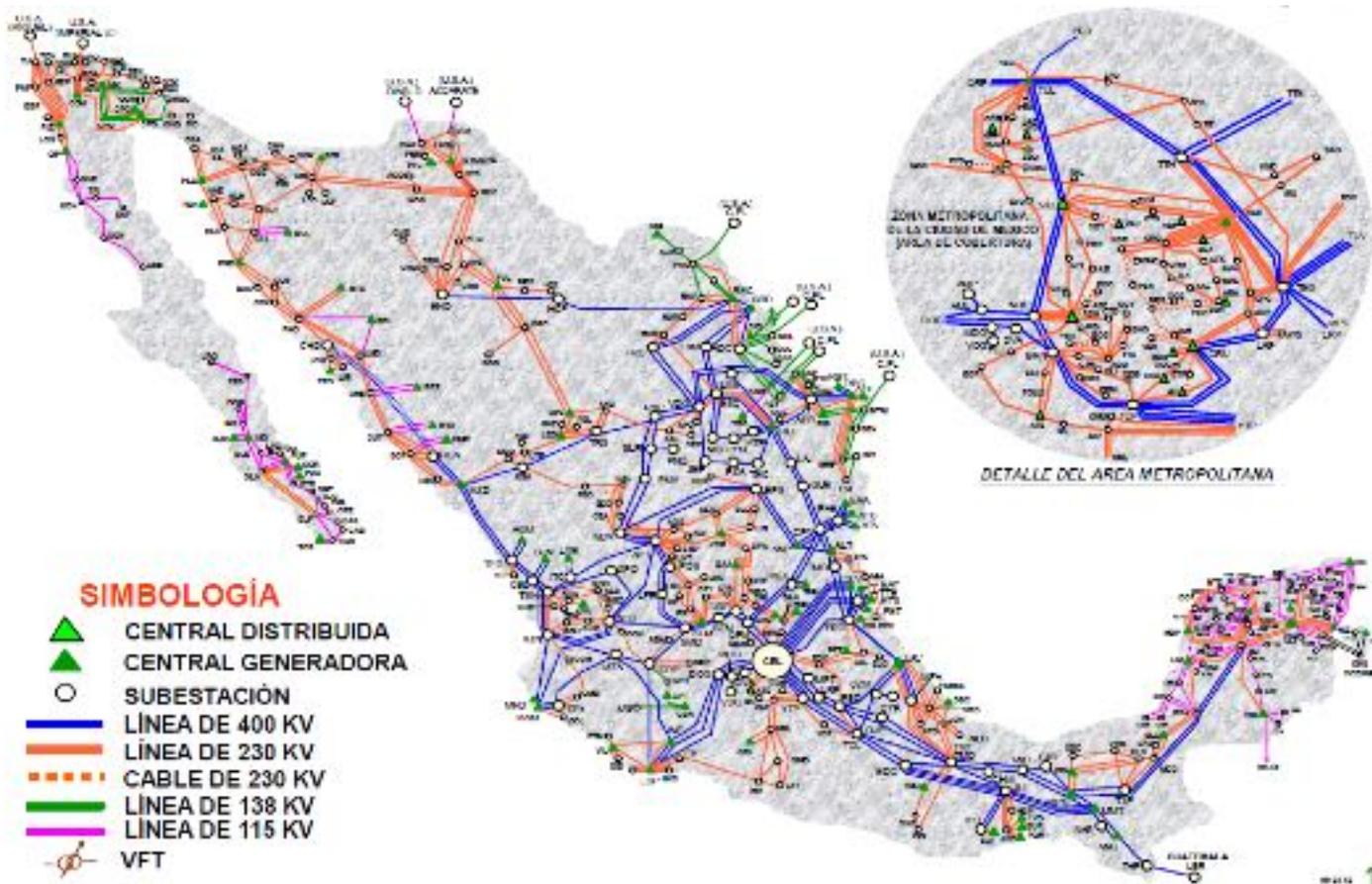


Figura 5. Red de potencia del sistema eléctrico nacional, sus fuentes de generación y enlaces entre regiones

La figura 3 muestra la red de potencia eléctrica nacional y las regiones de donde proviene el suministro de energía eléctrica hacia el área central del país. Los enlaces externos consisten en 16 líneas de 400 kV y 5 de 230 kV, que provienen de fuentes de generación lejanas con distancias mayores a 200 km.

Las zonas remotas de generación que suministran energía hacia el área central son:

- **Área Occidental**, zona Lázaro Cárdenas con las centrales Petacalco, Villita e Infiernillo. (1600MW)
- **Región Sureste**, con las centrales del sistema Hidroeléctrico Chicoasen, Malpaso, Angostura y Peñitas. (1800 MW)
- **Región Oriente**, con las centrales Laguna Verde (nucleoeléctrica), Tuxpan y Tres Estrellas (3500 MW)
- **Región Huasteca**, con la central Tamazunchale (1350 MW)

Sumando estas aportaciones de potencia, el total es de 8250 MW, que es inferior a la demanda máxima, que es aproximadamente de 8900 MW.

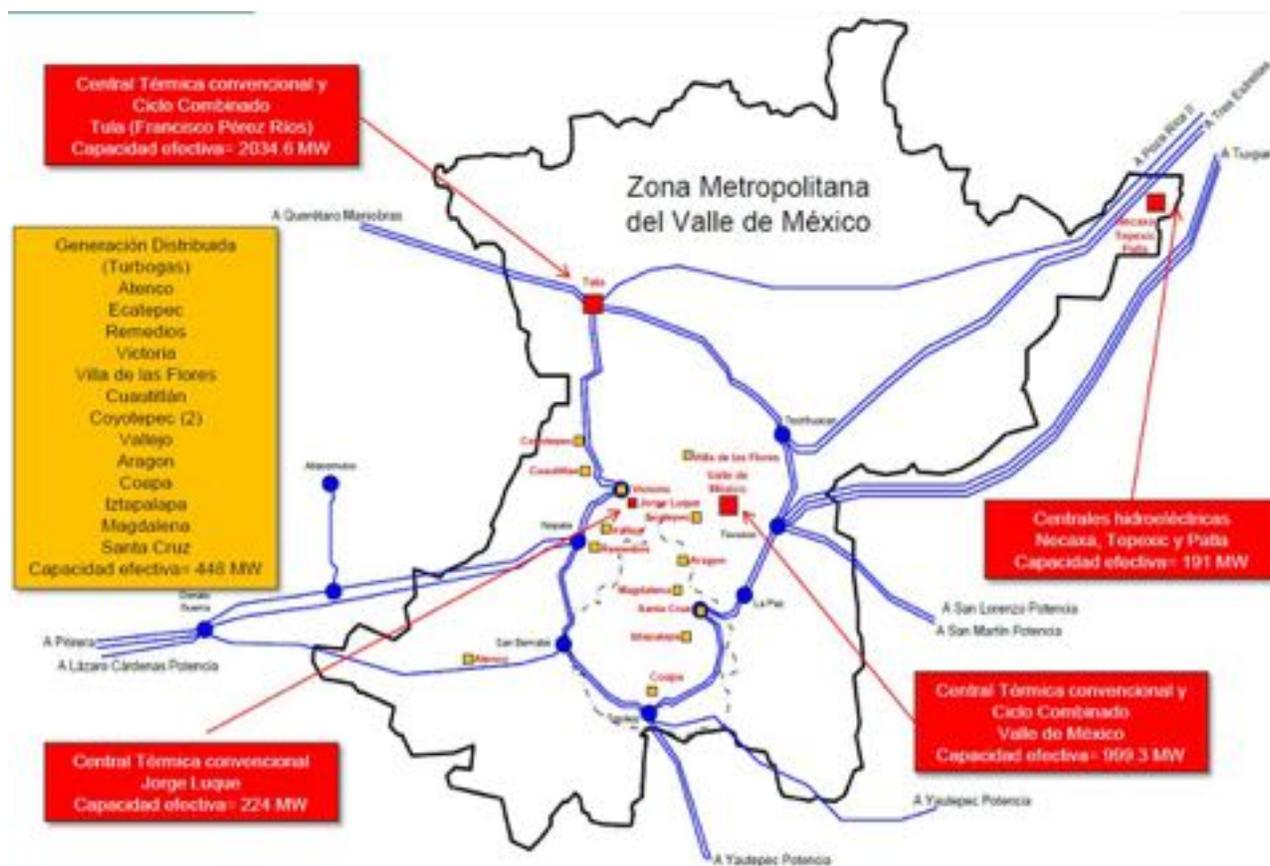


Figura 6. El doble anillo y sus enlaces con líneas de transmisión de 400 kV a fuentes generadoras remotas provenientes de la zona del golfo como es Tuxpan, Poza Rica II, Tres Estrellas; a San Martín y San Lorenzo Potencia en Puebla; a Querétaro; a Donato Guerra que tiene importantes enlaces con Lázaro Cárdenas Potencia, Infiernillo, Petacalco y Villita; y un enlace de Topilejo con Yautepéc Potencia

La ZMVM cuenta con diversos tipos de fuentes de generación eléctrica, figura 4, que refuerzan el anillo de 400 kV: Central Tula contribuye con 2034.6 MW, la generación distribuida contribuye con 448 MW, la generación hidroeléctrica con 191 MW, Valle de México Ciclo Combinado (CC) y convencional con 999.3 MW, la central convencional Jorge Luque contribuye con 224 MW.

Los dos centros de generación importantes en la ZMVM son la Central Termoeléctrica Tula y la Central Termoeléctrica Valle de México.

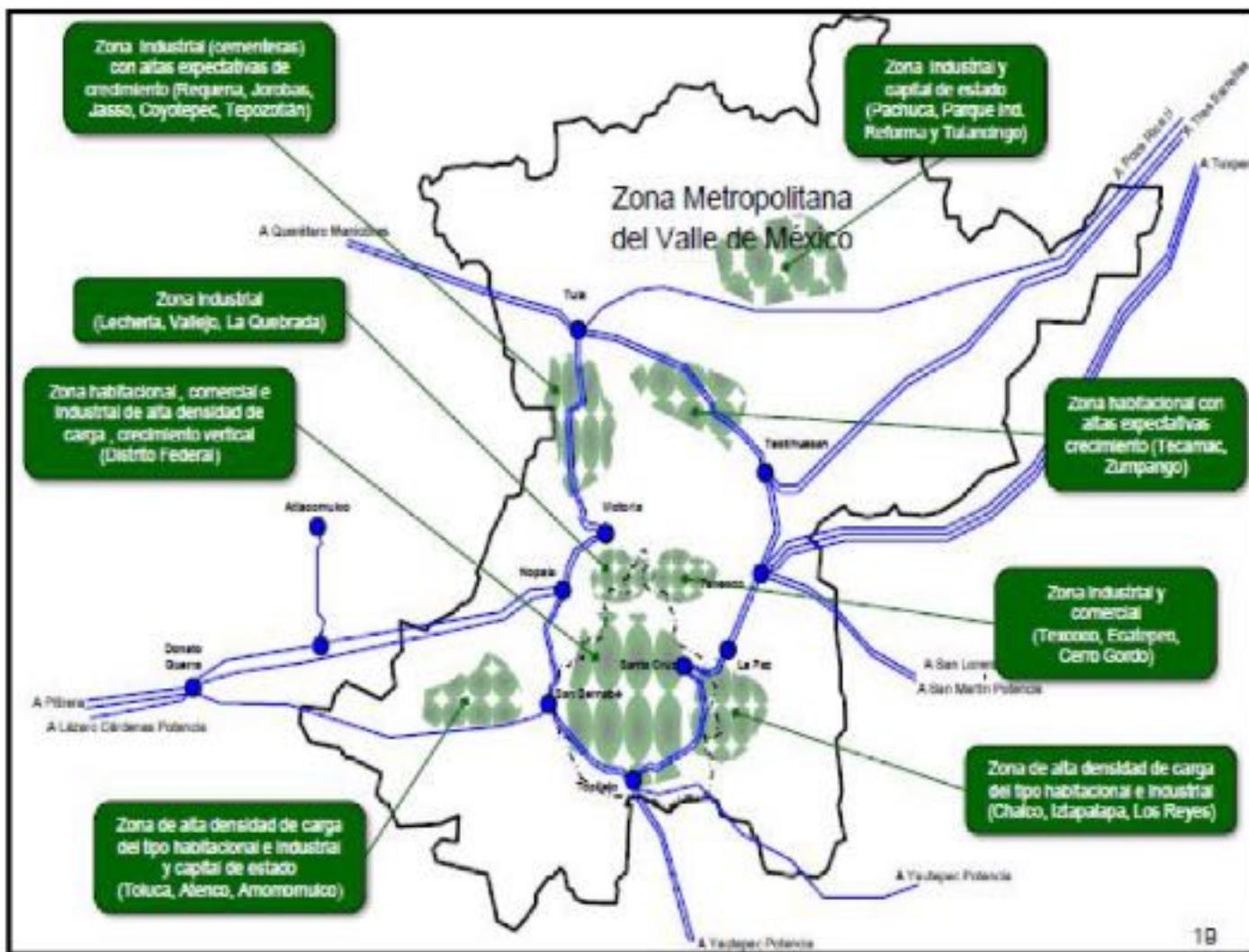


Figura 7 Mapa de la ZMVM mostrando las zonas de alta densidad de carga

Las zonas con alta densidad de carga en la ZMVM, están creciendo y ampliando su cobertura así como la demanda de energía eléctrica. Particularmente, las subestaciones Santa Cruz y La Paz se encuentran prácticamente rodeadas por la urbanización de la zona comprometiendo su capacidad de expansión en la tensión de 400 kV al no haber nuevos espacios o terrenos donde se pueda proyectar nuevas líneas que refuercen el enlace.

Como parte de los diagnósticos del Sistema Eléctrico del anillo de 400 kV, los estudios eléctricos realizados ilustran que las subestaciones con mayor cargabilidad de la ZMVM, destacan la subestación Texcoco (cargabilidad del 103 %) seguido, están las subestaciones La Paz y Santa Cruz acercándose a 32 MW, las cuales incrementarán la cargabilidad.

Cumpliendo con los programas de obras de modernización y actualización de la infraestructura eléctrica, en el año 2013 se concluyó la construcción del entronque en la S.E. La Paz de la línea Tuxpan-TEXCOCO incrementando la capacidad de transmisión de los corredores en 400 kV para evitar que Texcoco presente esos niveles de cargabilidad

La Red Troncal de 400 kV cuenta con 16 bancos de autotransformadores de 400/230/10 kV, 330 MVA cada uno, instalados en las subestaciones, Santa Cruz, Victoria, San Bernabé, La Paz y Teotihuacán, que junto con las subestaciones Nopala, Texcoco, Topilejo y Tula, son el enlace entre líneas fuente de 400 kV.

En la red de 400 kV se utilizan los bancos de autotransformadores de 400/230/10 kV, conectados en estrella / estrella con el devanado terciario conectado en delta aislada.

Adicionalmente para la regulación dinámica de tensión se cuenta con Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (CEV's) ubicados en las subestaciones de Texcoco, Nopala, Topilejo (-90, + 300 MVAR), La Paz (-90, + 300 MVAR) y Cerro Gordo (-75, + 300 MVAR).

Planes de aumento en capacidad de generación en la ZMVM y fuentes enlazadas al área Central.

Se ha proyectado la construcción para 2017 del doble circuito de la SE. VAE (Valle de México) Victoria en 400 kV.

Para el año 2017 la central generadora Valle de México II entrara en servicio con 601 MW y Valle de México III con 601 MW también para el año 2019.

La central generadora Jorge Luque se planea capacidad adicional para el año 2020 de 601 MW.

Se contempla adición de capacidad de generación para Villita Ampliación (Infiernillo) de 150 MW para el año 2019.

La Central Tula, 1160 MW para el año 2021 y para Central Tula II, 1160 MW para el año 2024.

CEVs INSTALADOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL AÑO 2005

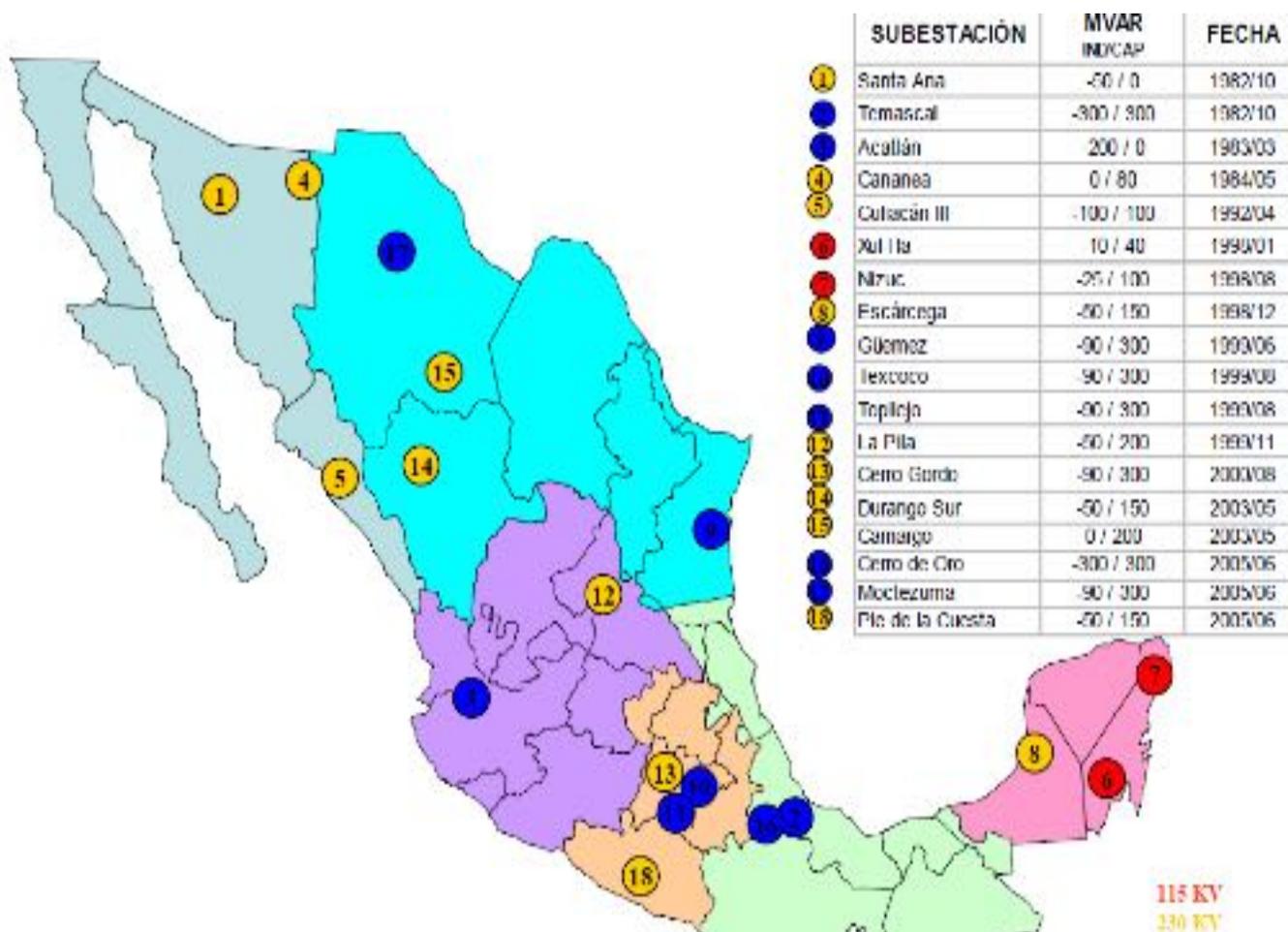


Figura 8. CEVs instalados en el país para control de potencia reactiva y voltaje

CEVs INSTALADOS EN EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL 2012



Perspectivas y planes

Proyectos de CEVs en Fase de Planeación

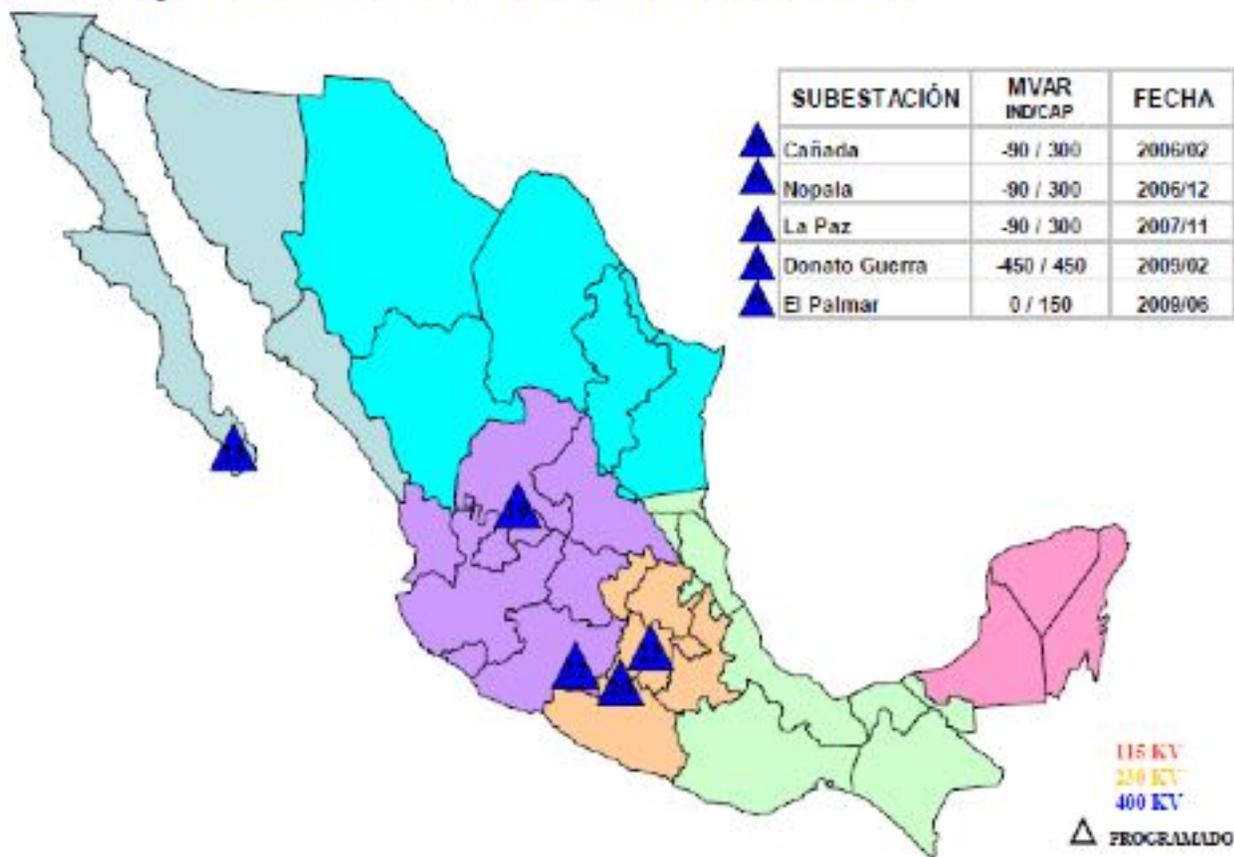


Figura 9. Aplicación de compensadores estáticos de potencia reactiva, CEVs, en subestaciones de potencia para mejorar el factor de potencia nivelando el voltaje a sus valores nominales y mejorando la capacidad de suministro de energía eléctrica.

APLICACIÓN DE COMPENSACION SERIE EN LINEAS DE TRANSMISION

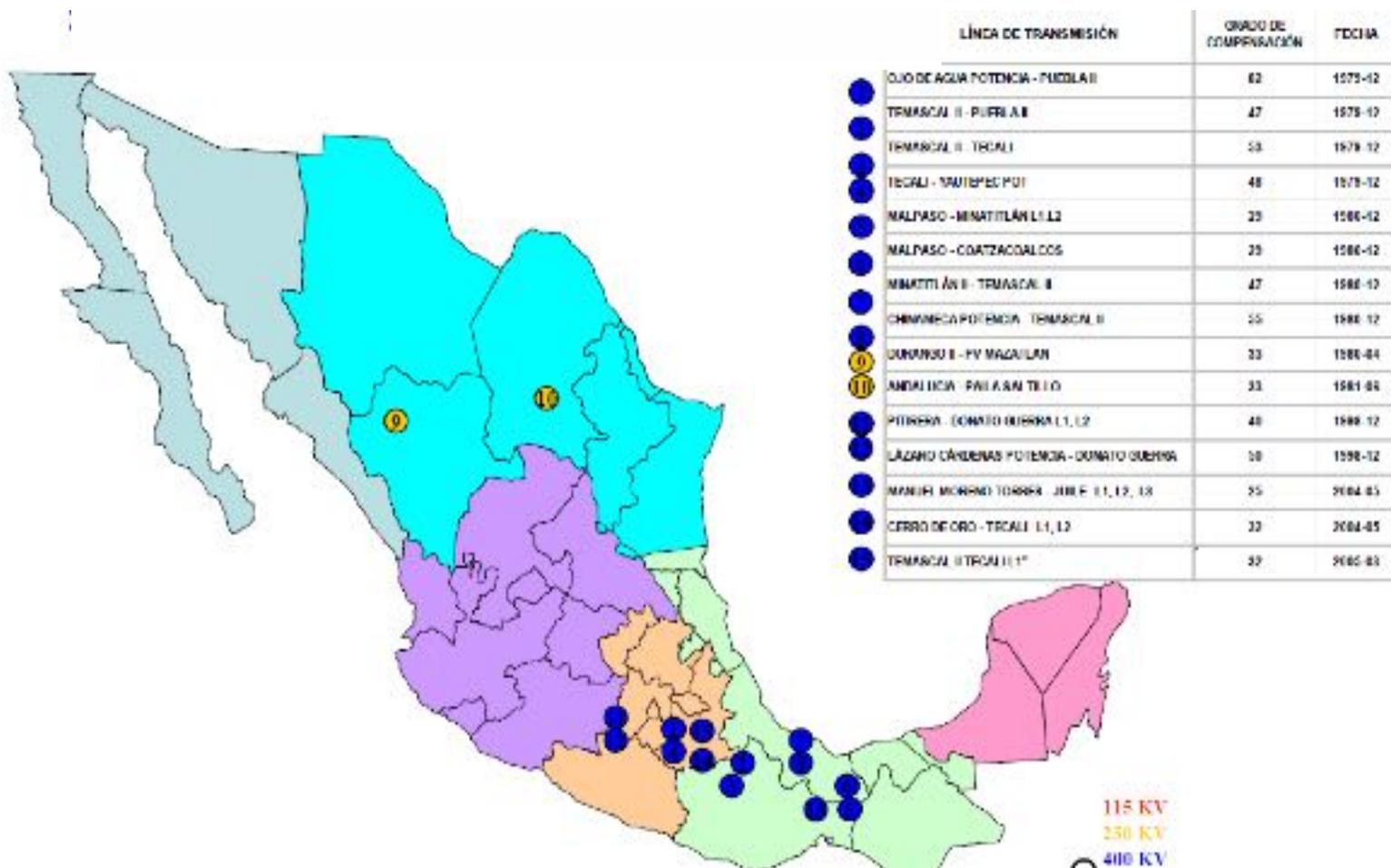


Figura 10. Aplicación de capacitores en serie para mejorar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica entre regiones del país.

Distribución de potencia eléctrica en Morelos

De las nueve áreas de control en México, el área de interés para el proyecto del sincrotrón, es el Área de Control Central del país. El SEN abastece de fluido eléctrico al estado de Morelos a través de 2 subestaciones de potencia: S.E. Morelos y S.E. Yautepec Potencia, esta energía proviene de fuentes de generación remotas.

La red de transmisión de potencia en Morelos también se enlaza (directamente) a través de S.E. Zapata con generación hidroeléctrica en el estado de Guerrero.

En el nivel de 400 kV el enlace es con S.E. Yautepec Potencia, capacidad instalada de 1375 MVA, y ésta se conecta al SEN a través de una línea de transmisión, 2 circuitos, con S.E. Tecali, Puebla, con un tramo de línea de cerca de 130 km.

La S.E. Tecali recibe energía eléctrica en nivel de tensión de 400 kV por líneas de transmisión que provienen de generadoras hidroeléctricas ubicadas en el sureste del país, en el estado de Chiapas. Estas son los complejos hidroeléctricos Chicoasen con potencia de generación de 2400 MW y el complejo Malpaso con 1080 MW de generación.



Figura 11. Red eléctrica de potencia en el área central del país y sus interconexiones con las líneas que proveen de energía eléctrica al estado de Morelos en 400 y 230 kV

S.E Tecali tiene interconexión en 400 kV con generadora nucleoelectrica Laguna Verde, 1365 MW, en el estado de Veracruz.

S.E Tecali se enlaza también, en nivel de tensión de 400 kV con S.E. Puebla II y con S.E. Temascal II.



El SEN abastece de fluido eléctrico al estado de Morelos a través de 2 subestaciones de potencia: S.E. Morelos y S.E. Yautepec Potencia, esta energía proviene de fuentes de generación remotas.

La subestación Morelos, capacidad instalada 120 MVA, recibe potencia eléctrica del anillo de 400 kV de la ZMVM nodo Topilejo en nivel de tensión de 230 kV, 2 circuitos, tramo de línea de aproximadamente 20 km.

Yautepec potencia también tiene conexión con el anillo de 400 kV de la ZMVM nodo Topilejo con 2 circuitos, 3 conductores por fase, en voltaje de 400 kV y tramo de línea de 37 km aproximadamente. La subestación Zapata se conecta a la central hidroeléctrica el Caracol, ubicada en el municipio de Apaxtla Guerrero, a través de una línea de 230 kV, 2 circuitos, y puede recibir energía de ésta dependiendo de las condiciones operativas de la planta.

La central hidroeléctrica el Caracol cuenta con 3 unidades generadoras de 208 000 kW cada una, para una capacidad instalada total de 624 000 kVA, desde la puesta en servicio, hasta el año de 1997. Su estadística indica una generación media histórica anual de 996.72 GWh. La energía producida se conduce por 2 líneas de transmisión de 230 kV hacia la subestación de enlace en Mezcala, la que a su vez la envía al puerto de Acapulco y al estado de Morelos, a través de la Subestación Zapata, integrándose así al sistema interconectado nacional

El estado de Morelos cuenta con una central Térmica con 2 unidades Generadoras de Electricidad de Ciclo Combinado (CCC) con capacidad de generación c/u de 622 MW, ubicadas en el sitio Huexca Aeropista, Cuautla. Ambas centrales consumen gas natural que es transportado por un gasoducto de PEMEX, proveniente de Tlaxcala de 150 km de longitud y un acueducto desde Cuautla con 10 km de longitud. La subestación Huexca se conecta, a través de una línea de transmisión de 400 kV, con Yautepec Potencia, tramo de línea de 20 km. Se provee de fluido eléctrico a 17 Subestaciones de Distribución en el estado:

S.E. Cuernavaca, S.E. Civac, S.E. Cuautla, S.E. Cuautla II, S.E. Jiutepec, S.E. Jojutla, S.E. Lomas de Cocoyoc, S.E. Tejalpa, S.E. Tepalcingo, S.E. Tezoyuca, S.E. Xochicalco, S.E. Temixco, S.E. Zapata, S.E. Oacalco. S.E. Los Arcos, en Yautepec, S.E. Tabachines en Cuernavaca y la S.E. Centenario, en el Parque Científico y Tecnológico.

Yautepec Potencia abastece S.E. Zapata a través de una línea de 230 kV. La S.E. CUAUTLAI (industrial) de 30 MVA de potencia está conectada a S.E. CUAUTLA

con una línea de 230 kV. La S.E. Zapata se conecta con Cuernavaca con una línea 2 circuitos de 85 kV, tramo de línea de 11 km. S.E. Oacalco-San Carlos, capacidad de 30 MVA, una línea de abasto de 230 kV la conecta con la S.E. Yautepec Potencia. S.E. Civac se alimenta de S.E. Zapata a través de una línea de 115 kV. La S.E. Zapata se conecta con la S.E. Cementos Moctezuma a través de una línea de 230 kV, 2 circuitos.

La S.E. Temixco (subestación encapsula en hexafluoruro de azufre) se alimenta de una línea de transmisión de 115 kV desde S.E. Zapata, tiene una capacidad instalada de 30 MVA. La S.E. Los Arcos se conecta con Yautepec potencia en 230 kV potencia instalada 30 MVA. La S.E. Centenario de 30 MVA se conecta con Zapata en 230 kV.

Conclusiones

Se concluye en este trabajo lo siguiente: se proponen dos regiones factibles dentro del estado de Morelos, en cuanto a la calidad, control, flexibilidad, estabilidad, confiabilidad y capacidad de suministro de energía eléctrica para alimentar la acometida que proporcione flujo eléctrico a las instalaciones del sincrotrón mexicano.

Los números dados a las regiones de interés indicadas en el mapa de la figura 13, se refieren a la confiabilidad de la zona en cuanto a que la red eléctrica asociada cumple los requerimientos de demanda de energía eléctrica en el nivel de tensión de 230 kV. Se propone este nivel de tensión de alimentación por las características de las instalaciones y equipos varios que componen al complejo acelerador, es decir, el nivel de tensión es robusto, la probabilidad de contingencia es relativamente bajo comparado con niveles de tensión más bajos.

Criterios considerados:

La región 1, figura 13, consta de una línea de 230 kV, 2 circuitos proveniente de la SE Topilejo y entronca con SE Morelos. Es una línea limpia, no se conecta con otras subestaciones de zonas industriales y está sobrada en su capacidad de transmisión de potencia eléctrica, puede transmitir 1800 MVA de potencia.

El nodo Topilejo consta de una subestación incorporada al anillo de 400 kV de la ZMVM que tiene interconexión con SE Santa Cruz y con San Bernabé, no hay zona industrial en el área de Topilejo ni en sus alrededores, solo comercial y residencial. Por lo tanto, la probabilidad de tener deformaciones de onda de voltaje, reactivos no deseados, armónicos, fluctuaciones de voltaje o variaciones en la frecuencia es muy



baja. No hay evidencia de planes de construcción de corredores o parques industriales en la zona que rodea a la SE Topilejo.

SE Topilejo tiene instalados compensadores estáticos de vars (CEVs) para regular la potencia reactiva y control de voltaje con todas sus interconexiones. Y por lo tanto reserva de potencia reactiva.

La línea de transmisión a San Bernabé está muy sobrada en su capacidad, y como se puede ver en el diagrama de la Fig. 11, San Bernabé se conecta con Donato Guerra y ésta subestación recibe potencia de la región sur que es muy robusta en la generación, y además cuenta con CEVs; las líneas que entroncan a Donato Guerra tienen compensadores en sus líneas para el voltaje. Aunado a esto el anillo está interconectado a un gran número de fuentes generadoras de energía de diversos tipos. La SE Santa Cruz es muy robusta y tiene respaldo a través de varias líneas de diversas fuentes y las subestaciones cercanas tienen CEVs (La Paz, Texcoco).

SE Topilejo se enlaza con Yautepec Potencia con una línea de 400 kV 2 circuitos, con capacidad de transmisión de 1800 MVA. Prácticamente su contribución de potencia al anillo de 400 kV de la ZMVM es baja (similar al enlace de Topilejo con San Bernabé).

En síntesis, las posibilidades de elevaciones, caídas y colapso de voltaje, variaciones en frecuencia, alteraciones de las señales de voltaje y corriente, falta de capacidad de suministro de potencia, inyección de reactivos no deseados a la línea de transmisión Topilejo Morelos son, casi en su totalidad, nulas.

Por otro lado, el número 2, figura 13, indica la región alrededor de SE Yautepec y siguiendo el derecho de vía, abarca una franja alrededor de la línea de transmisión que pasa por Tepoztlán. También contempla parte del área que rodea a la línea de alto voltaje que se dirige a la Central Huexca. Esta zona contiene a sus alrededores el Corredor Industrial Yecapixtla, y no muy retirado, el Parque Industrial Cuautla y otras industrias diversas dispersas en la región. Es también una zona potencial para la instalación de nuevas industrias.

Yautepec Potencia se enlaza con Tecali, con Topilejo y con la Central Huexca con líneas de voltaje de 400kV. La línea Yautepec-Tecali tiene compensador serie para la transmisión de potencia. Huexca genera reactivos para la regulación de voltaje de generación. Hay 20 km de línea de SE Yautepec a SE Huexca, la potencia reactiva no se puede transmitir a largas distancias por la impedancia de línea. Al no tener SE Yautepec potencia CEVs, este nodo no tiene manera de regular el voltaje y controlar el

flujo de potencia reactiva con sus enlaces. Por lo tanto, si es un nodo robusto pero no garantiza calidad en el suministro de la energía eléctrica.

Existe la posibilidad de que en esa región se instalen nuevas industrias, y si estas cuentan con grandes rectificadores, convertidores estáticos de frecuencia, ciclo convertidores, motores asincrónicos; o son fundidoras y emplean hornos de arco, etc., pueden contaminar las señales de voltaje e inyectar armónicos en las líneas así como inyectar o absorber potencia reactiva del sistema, afectando calidad de la energía eléctrica.

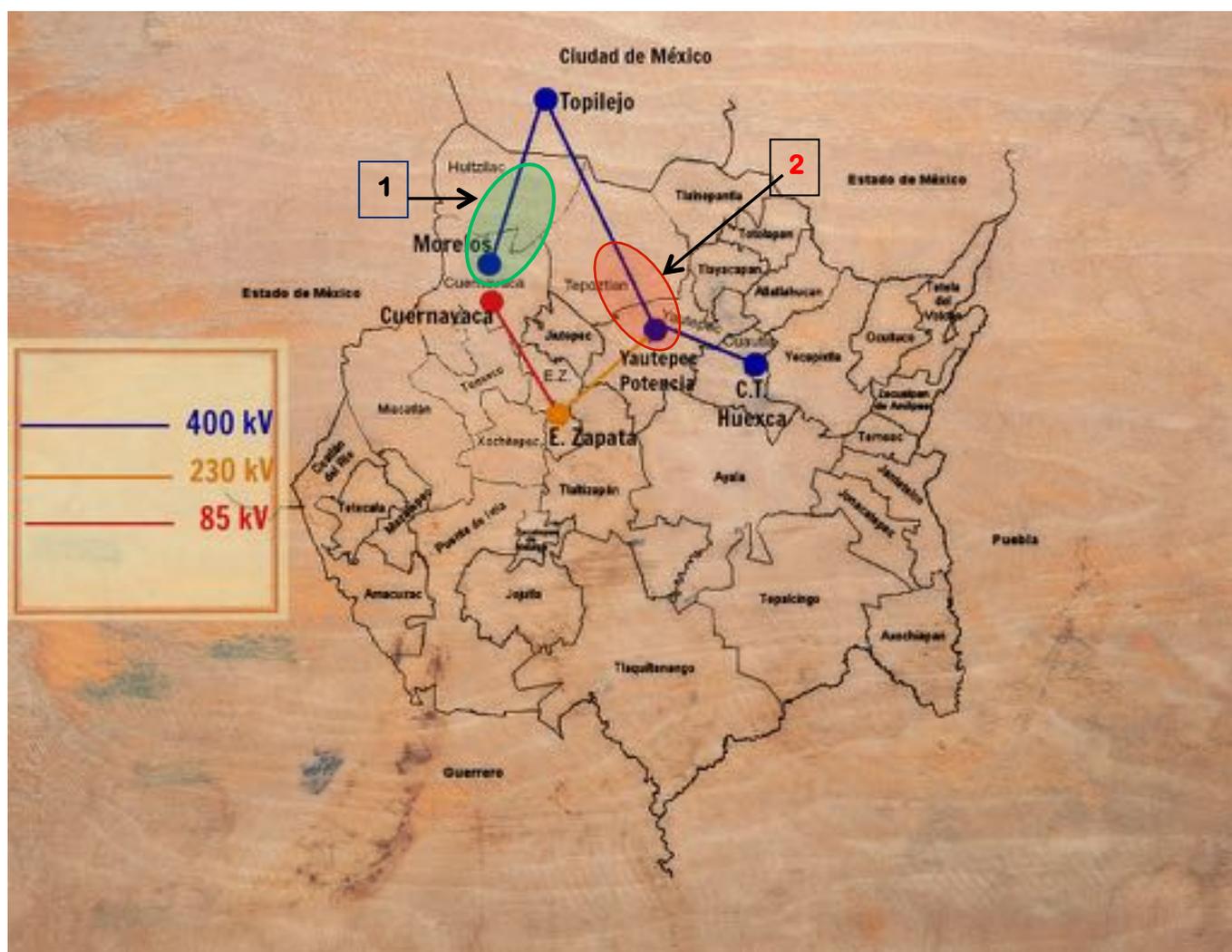


Figura 13 Se indican las regiones factibles para la construcción del sincrotrón en Morelos. La región 1 (verde) indica el área con las mejores características en el suministro de potencia eléctrica. La roja es alternativa.



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

**Fuentes de Rayos X Duros Para el
Sincrotrón Mexicano**

Dr. Juan Reyes Herrera

Introducción

Una parte primordial para el diseño del sincrotrón mexicano es la de definir la energía del anillo de almacenamiento. Uno de los criterios para elegir la energía es el de estudiar el espectro electromagnético que se obtendrá por la radiación sincrotrón. Es importante recalcar que según el intervalo de energía del espectro que se obtenga, serán las aplicaciones disponibles para los futuros usuarios de este proyecto.

En la actualidad, existen tres grupos principales de anillos de almacenamiento pertenecientes a las fuentes de luz sincrotrón, los cuales se clasifican por la energía del haz de electrones. Se tienen de baja energía (< 2 GeV) para la generación de radiación ultravioleta y rayos X blandos, de alta energía (6-8 GeV) para la generación de rayos X duros, y finalmente los de energía intermedia (2.5-3.5 GeV). El proyecto del sincrotrón mexicano está planeado para ser uno de energía intermedia. Además de tener ser bastante rentables [1], existen diversas razones por las cuales los anillos de almacenamiento de energía intermedia (IELS) se han popularizado alrededor del mundo, principalmente por su alto desempeño debido a desarrollos tecnológicos recientes, como sistemas de retroalimentación para controlar inestabilidades, mejores cavidades de radiofrecuencia, entre otros [2]. Un desarrollo tecnológico importante es el del mejoramiento de Dispositivos de Inserción (IDs) como el de los Onduladores [3].

Estas tecnologías incluyen el desarrollo de Onduladores en vacío, de pequeña abertura (*small gap*) y de periodo corto (*short-period*), así como de imanes deflectores superconductores. Estos desarrollos permiten que anillos de relativamente baja energía puedan entregar rayos X duros (5-50 keV) [2]. En la actualidad, existen varios dispositivos de inserción que pueden proporcionar rayos X duros de un IELS. El objetivo del presente trabajo es el de estudiar estos dispositivos bajo los parámetros que se tienen para en el diseño de la fuente de luz.

Fuentes de Rayos X Duros para Sincrotrones de Energías Intermedias

La energía crítica de la radiación sincrotrón ε_c está dada por la relación

$$\varepsilon_c[\text{keV}] = 0.665 B[\text{T}]E^2[\text{GeV}] \quad (1)$$

donde E es la energía del haz de electrones y B es el campo magnético de un imán deflector de haz (BM) o de un ID del tipo *Wiggler*. En los experimentos se puede utilizar una energía máxima de $4\varepsilon_c$ [1]. En el caso de un ID como el Ondulador el espectro de radiación consiste en una serie de picos discretos de armónicos con una energía de los fotones ε_n

$$\varepsilon_n[\text{keV}] = \frac{0.95 n E^2[\text{GeV}]}{\lambda_u[\text{cm}](1+K^2/2)} \quad (2)$$

en la que λ_u es el periodo del Ondulador (ver figura 1), n es el armónico de radiación, y K es el parámetro de la fuerza magnética del Ondulador; el cual se define de la forma [4]:

$$K = e\hat{B}\lambda_u/2\pi\beta mc \quad (3)$$

e es la carga unitaria, \hat{B} es el campo magnético máximo, m la masa del electrón, y β es la velocidad relativa entre la velocidad del electrón y la de la luz (c). También se utiliza otra expresión en unidades prácticas

$$K = 0.0934 \hat{B}[\text{T}]\lambda_u[\text{mm}] \quad (4)$$

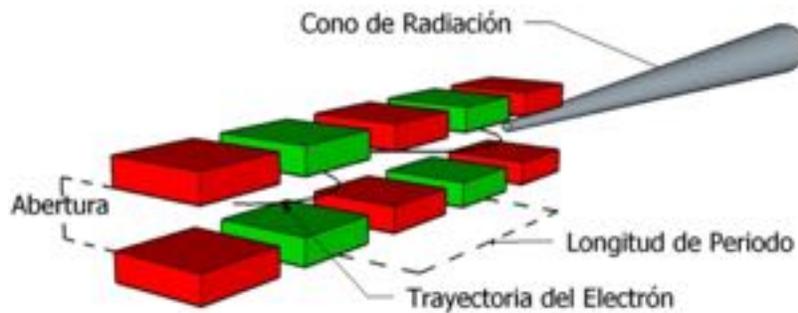


Figura 1. Esquema de una parte de la estructura magnética de un Ondulador, cabe recalcar que el ángulo característico de emisión de rayos X (θ) está dado por $\theta = (\gamma\sqrt{N})^{-1}$, donde γ es el factor relativista y N el número de polos del Ondulador.

De las expresiones anteriores, es claro que para obtener las energías de rayos X duros es necesario aumentar una o algunas de las variables como la Energía del haz de electrones (E), el campo Magnético (B) o, en el caso de los Onduladores, disminuir la longitud de periodo (λ_u). Debido a que el costo de una instalación de sincrotrón escala con la energía de los electrones, actualmente existen y se encuentran en desarrollo diferentes tecnologías para tener IDs y BMs con campos magnéticos más intensos y aberturas más pequeñas; así como con longitudes de periodo más cortas en el caso de los Onduladores. Los dispositivos que tienen mayor potencial para la extracción de rayos X duros de una fuente de luz sincrotrón como la del proyecto mexicano, son los siguientes:

- Imanes deflectores de Campo Alto o *Super-Bend* (SBMs)
- *Wigglers* super-conductores (SCWs)
- Onduladores de periodo-corto en Vacío (IV-SPUs)
- Onduladores super-conductores (SCUs)
- Onduladores criogénicos de imanes permanentes (CPMUs)

Imanes deflectores de Campo Alto o *Super-Bend* (SBMs)

Para una energía del haz de electrones fija es claro que una forma de obtener rayos X más energéticos es la de aumentar la intensidad del campo magnético (ecuación 1), algunas instalaciones de luz sincrotrón han optado por esta opción en el caso de imanes deflectores. Por ejemplo, se tiene el caso de SIRIUS (Brasil), en éste se propone utilizar SBMs de 2 T para producir fotones de rayos X duros [5]. Otro caso es el propuesto por investigadores del sincrotrón chino SSRF, para la fase II del proyecto de líneas de haz se está considerando intercambiar BM normales por SBMs para la producción de rayos X duros [6]. Debido a que el haz de luz proveniente de un imán dipolar es un abanico, estas fuentes pueden cubrir experimentos que requieran rayos X duros pero no necesariamente una alta brillantez.

Wigglers super-conductores (SCWs)

Como se mencionó anteriormente, para obtener rayos X más energéticos de un *Wiggler* es inevitable tener que aumentar el campo magnético, para esto es necesario utilizar la tecnología de bobinas a base de materiales superconductores. En la actualidad existen varios IELS que utilizan SCWs para obtener rayos X duros, en la tabla 1 se muestran algunos de éstos. Cabe notar que estos SCWs fueron construidos en el Instituto de Física Nuclear Budker, Novosibirsk, Rusia [7].

Tabla 1. Ejemplos de IELS que utilizan como fuente de luz sincrotrón un SCW: el sincrotrón Canadiense (CLS), el sincrotrón Inglés (DLS), el Italiano (Elettra) y el sincrotrón Español (ALBA). En la tabla E es la energía del haz de electrones y E_p la energía de los fotones.

| Sincrotrón | E (GeV) | Línea de Haz (<i>Beamline</i>) | E_p (keV) |
|------------|-----------|----------------------------------|-------------|
| CLS | 2.9 | BMIT | 20-100 |
| DLS | 3 | I12 | 50-150 |
| Elettra | 2.4 | XRD2 | 8-30 |
| ALBA | 3 | BL04- MSPD | 8-50 |

Debido su temperatura de operación de 4 K (la temperatura del He), la construcción y operación de los SCWs es significativamente más elevada que la de los hechos a base de imanes permanentes. Es por esto que existen algunos esfuerzos para construir *Wigglers* de campos magnéticos altos basados en imanes permanentes. En estos últimos se pueden obtener campos magnéticos intensos al aprovechar las pequeñas aberturas (*small gaps*) disponibles en las secciones rectas en el anillo de almacenamiento de un sincrotrón moderno [8].

Onduladores de Período-Corto en Vacío (IV-SPUs)

En la mayoría de instalaciones de energía intermedia, un Ondulador de período corto (SPU) con una pequeña abertura del imán es la única manera de alcanzar el intervalo de rayos X duros. A pesar del uso frecuente de un dispositivo de inserción (ID) fuera de vacío ya sea híbrido o de estructura pura en las últimas dos décadas, la longitud del período y la abertura de estos ID son grandes, lo que hace imposible el logro de gran brillantez en fotones de rayos X duros en las instalaciones de energía media. Para reducir la abertura de los ID existen los Onduladores en Vacío (IVUs) en los que, en principio, la distancia de abertura mínima está limitada por la aceptación (*acceptance*) del haz de electrones. La tecnología de los IVUs con imanes permanentes o de estructuras híbridas a temperatura ambiente está bastante madura y ha sido ampliamente utilizada en la última década. Este IVU puede ser un Ondulador de período corto, por lo que presenta una mejora de la brillantez de fotones de rayos X duros en una instalación de energía media (alrededor de 3 GeV) [9]. En el trabajo de Hwan et al. [9] se encuentra una excelente explicación de las ventajas y desventajas del uso de Onduladores en vacío; así como una tabla que muestra las características de algunos IVU que se utilizan en varias fuentes de luz sincrotrón.

Onduladores super-conductorer (SCUs)

Al reducir la longitud de período de un Ondulador se pueden generar fotones de altas energías a partir de electrones de energías bajas, pero esta reducción acarrea algunos costos. Primero, al reducir λ_u también se reduce proporcionalmente K , lo cual resulta en la reducción de la cantidad de fotones de energías altas emitidos [10]. Esta dificultad se puede sortear utilizando campos magnéticos mucho más intensos, los cuales pueden ser alcanzados con la tecnología de super conductores. Desde 1990 se presentaron diferentes propuestas para reemplazar los imanes permanentes por alambres o tiras de superconductores para aumentar la intensidad de campo magnético en los Onduladores [11] y [12].

Existe un estudio muy completo sobre Onduladores Superconductores en el trabajo de J. Bahrtdt y Y. Ivanyushenkov [13] en el que se discute el desempeño de SCUs de bobinas de NbTi y Nb₃Sn. Una de las conclusiones de este trabajo es que la tecnología de SCUs permite un desempeño excelente en el espectro que se puede obtener.

Hasta el momento, en todo el mundo existen solamente dos SCUs en operación; uno es el que está instalado en la fuente de luz ANKA [14] y el otro en el APS [15]. Con la presente tecnología se tienen varias dificultades, por ejemplo, la de medir con precisión los campos magnéticos (junto con la de luego corregir los errores de campo) del SCU, ya que está embebido en una criostato que limita el acceso al dispositivo, ver figura 2. Otro problema está en el diseño y construcción, ya que el sistema criogénico debe de ser capaz de mantener la temperatura lo suficientemente baja y contrarrestar el calentamiento debido al haz de electrones y la radiación sincrotrón que se produce en otros dispositivos aguas arriba (*upstream*) [15]. A pesar de estas y otras dificultades, estos dispositivos presentan un excelente desempeño.

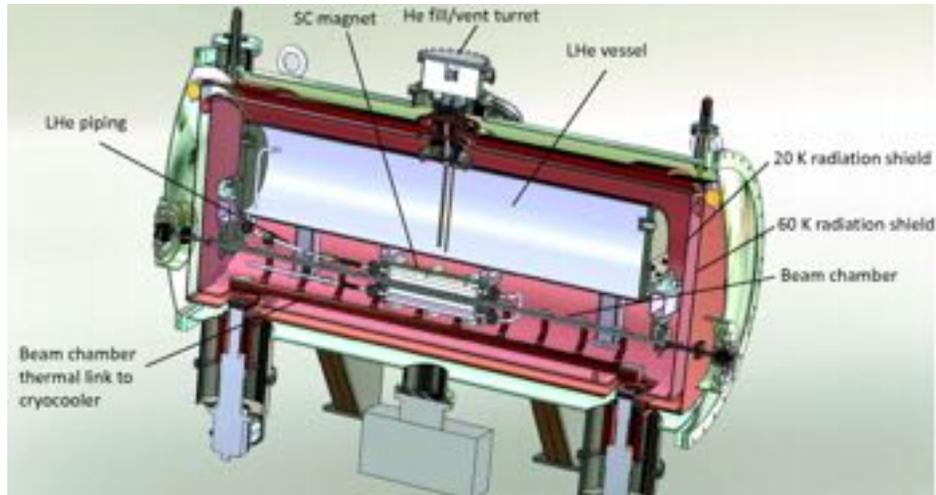


Figura 2. Vista interna del criostato del SCU instalado en el APS [1].

Onduladores criogénicos de imanes permanentes (CPMUs)

Otra opción para obtener campos magnéticos intensos en un Ondulador de periodo corto es la de utilizar imanes permanentes basado en elementos de tierras raras (RE), por ejemplo algunas aleaciones que contengan Nd, Sm o Pr. Para longitudes de periodo cortas ($\lambda_u \leq 9$ mm) los CPMUs pueden alcanzar los mismos niveles de intensidad de campos magnéticos que los SCUs [13]. Los CPMUs tienen algunas ventajas sobre los SCUs, debido a que la temperatura de operación de los CPMUs es del orden del nitrógeno líquido o mayor, tanto los costos de operación como los problemas de calentamiento son mucho menores; otra ventaja es que no existen dificultades para realizar las correcciones de campo ya que, a diferencia de los SCUs, se pueden utilizar las técnicas existentes para realizar estas correcciones [16].

En la actualidad existen diferentes dispositivos CPMUs que se encuentran en desarrollo. Por ejemplo los que se mencionan en el trabajo de Bernabderrahmane et al. [17]: dos CPMUs se construyeron usando $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ en el ESRF [18] (ver figura 3), SPring-8 y Danfysik construyeron CPMUs del tipo $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ respectivamente para el SLS y Diamond, en el HZB, en la UCLA and el BNL construyeron y probaron el desempeño de un prototipo CPMU de $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, y en BESSY construyeron y probaron un prototipo de $(\text{Nd}_{0.2}\text{Pr}_{0.8})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, se pueden consultar las referencias para cada uno de los casos en el trabajo mencionado [17]. Hasta el momento los resultados son bastante prometedores, por lo que los CPMUs dominarán la tecnología de los onduladores de periodo corto [13], tanto para anillos de almacenamiento como para láseres de electrones libres (FELs) [19] y [20].

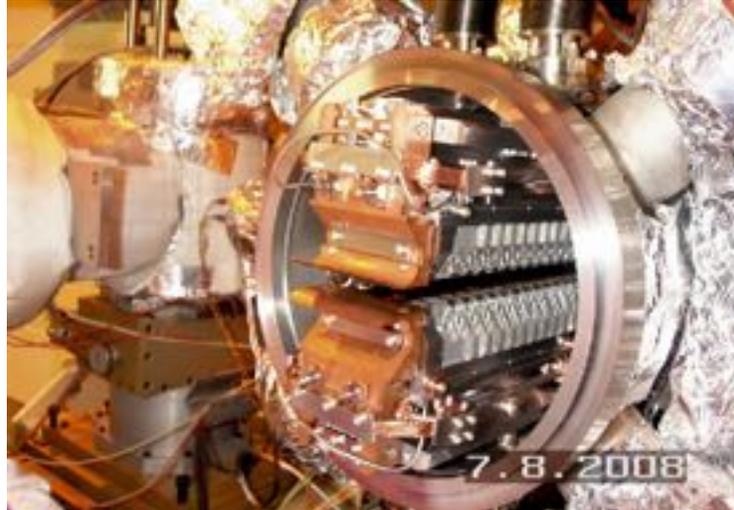


Figura 3. Entrada del CPMU en desarrollo en la fuente de luz sincrotrón ESRF [15].

Cálculos de los espectros de radiación de los diferentes dispositivos

Los parámetros del anillo de almacenamiento que se utilizarán para el cálculo de los espectros para los diferentes dispositivos se muestran en la tabla 2. Estos parámetros provienen de resultados de diseño preliminares por lo que no son los definitivos.

Tabla 2. Parámetros del haz de electrones del proyecto del sincrotrón mexicano, estos corresponden las líneas rectas en donde se montan los IDs.

| | |
|----------------------------|--|
| Energía | $E = 3 \text{ GeV}$ |
| Circunferencia | 300 m |
| Corriente de Haz | $I=250 \text{ mA}$ |
| Emitancia Horizontal | $\varepsilon_x = 1.1 \text{ nm rad}$ |
| Emitancia Vertical | $\varepsilon_y = 0.161 \text{ pm rad}$ |
| Función β Horizontal | $\beta_x = 2.06 \text{ m}$ |
| Función β Vertical | $\beta_y = 1.32 \text{ m}$ |

Los códigos que se utilizaron para obtener los espectros de radiación, flujos y brillantez aproximada de las diferentes fuentes fueron XOP (*X-ray Oriented Programs*, ver. 2.3) [21] y SRW (*Synchrotron Radiation Workshop*, ver. 3.92) [22].

Espectro de SBM

Existen diferentes SBMs que se podrían utilizar para la fuente de sincrotrón de México, por ejemplo si se decidiera por los SBMs utilizados en el ALS, los cuales tienen un campo magnético de 5 T [23] se obtendría un flujo como se muestra en la gráfica de la figura 4, y una brillantez como la que se muestra en la figura 5.

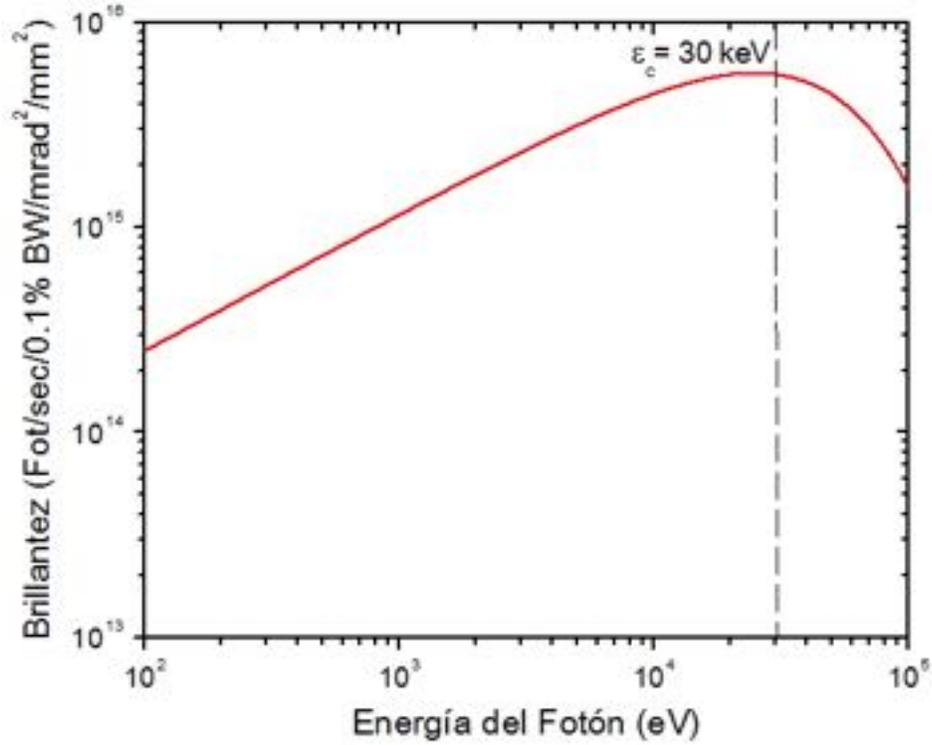


Figura 4. Flujo de un SBM de 5 T en función de la energía del fotón, la energía del haz de electrones es de 3 GeV [21].

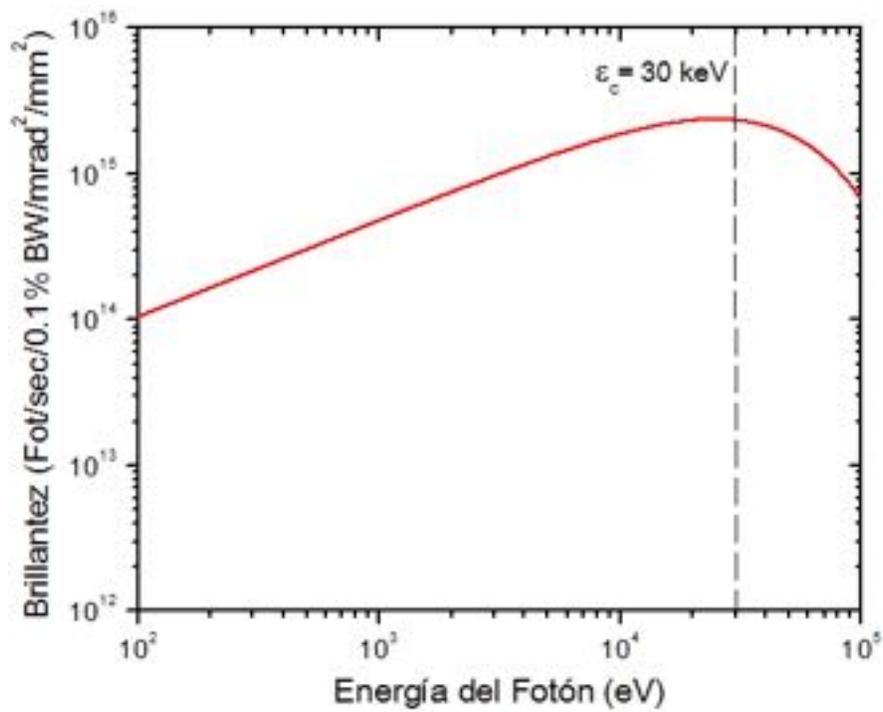


Figura 5. Brillantez de un SBM de 5 T en función de la energía del fotón [22].

Espectro de SCW

En el caso de un SCW, se podría implementar uno que tuviera las características parecidas a las del SCW del sincrotrón Elettra [24]. Las cuales se pueden ver en la tabla 3.

Tabla 3. Características del SCW implementado en la fuente de luz Italiana Elettra [24].

| | |
|------------------------|--------|
| Campo Magnético Máximo | 3.5 T |
| Longitud de Periodo | 64 mm |
| Número de Polos | 49 |
| Fuerza Magnética K | 20.921 |

El flujo que se obtendría sería como el que se muestra en la gráfica de la figura 6, y una brillantez como la que se muestra en la figura 7.

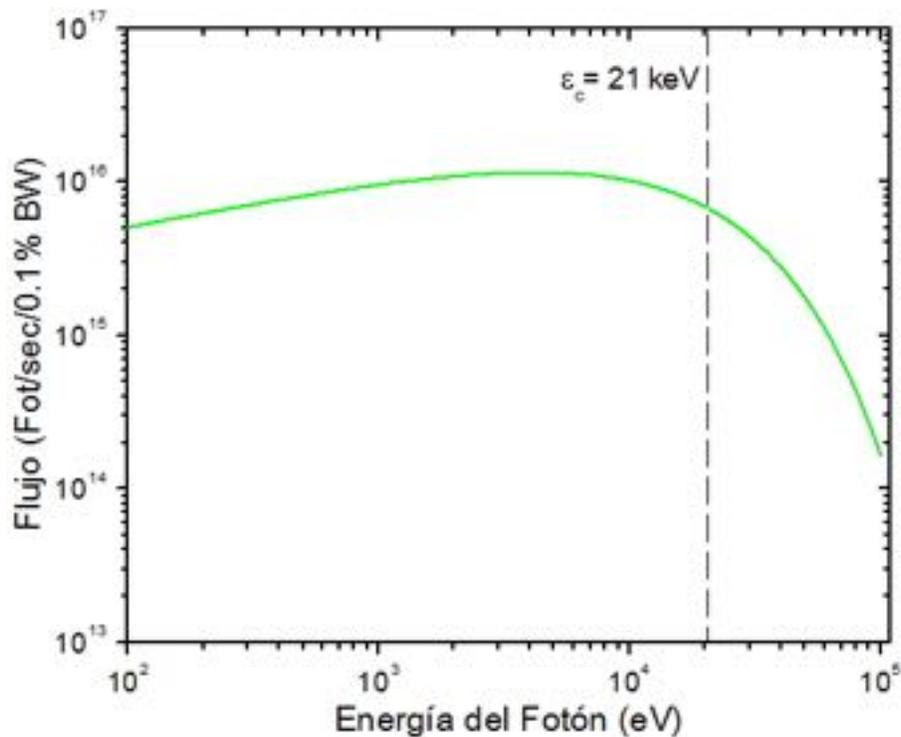


Figura 6. Flujo de un SCW en función de la energía del fotón, la energía del haz de electrones es de 3 GeV [21].

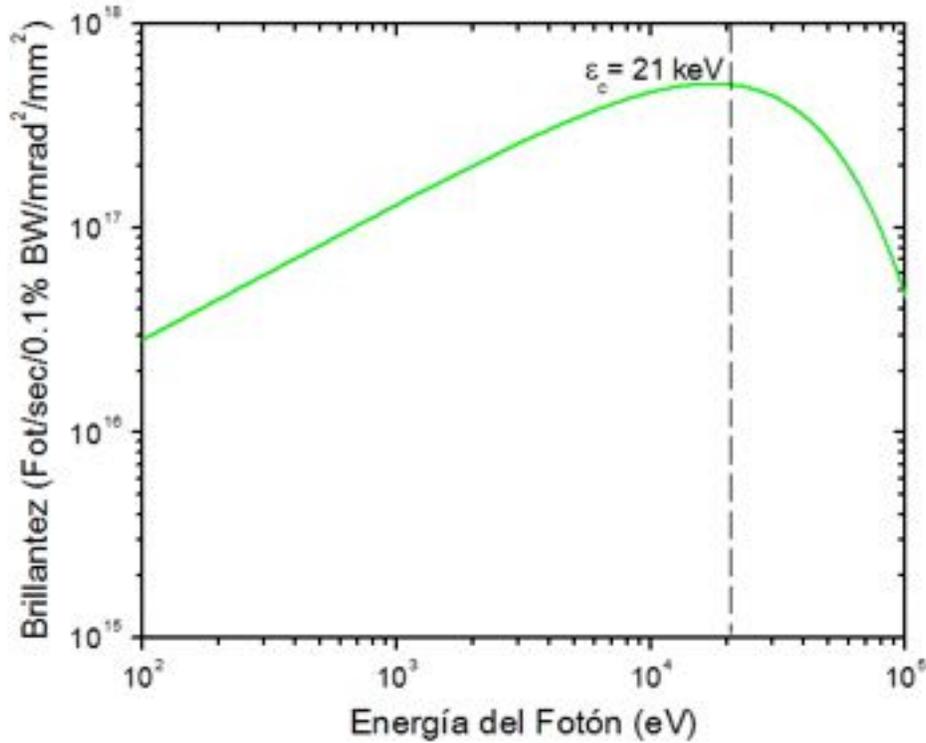


Figura 7. Brillantez de un SCW en función de la energía del fotón, para los parámetros del proyecto Mexicano (Tabla 2) [22].

Espectro de IV-SPU

En el caso de un Ondulador de Periodo Corto en vacío, existen diferentes opciones, este tipo de IDs son el caballo de por ejemplo un Ondulador en vacío de periodo corto desarrollado para la fuente de luz DIAMOND, cuyas especificaciones se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Características del IV-SPU desarrollado para DLS.

| | |
|---------------------------|--------|
| Campo Magnético Máximo | 0.60 T |
| Longitud de Periodo | 24 mm |
| Número de Periodos | 80 |
| Fuerza Magnética <i>K</i> | 1.36 |

La brillantez que se podría obtener, con los parámetros del sincrotrón para México, del armónico 1 hasta el 11 se muestran en la figura 8.

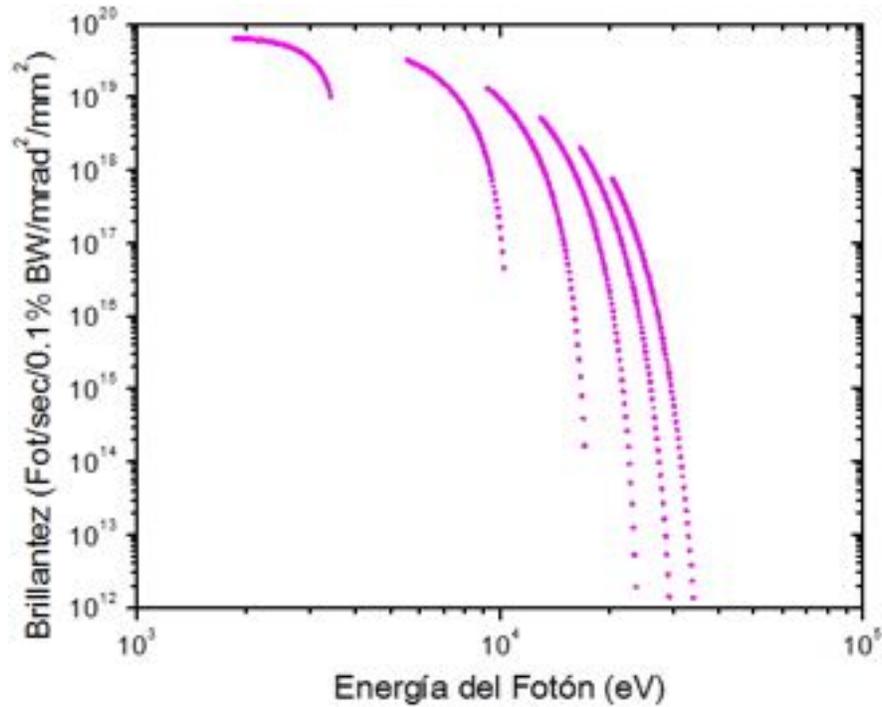


Figura 8. Brillantez de los armónicos de un IV-SPU en función de la energía del fotón, para los parámetros del proyecto Mexicano (Tabla 2) [22].

Espectro de SCU

Se podría utilizar un SCU como el que está implementado en el APS [15] que tiene las características de la tabla 5.

Tabla 5. Características del SCU instalado en la fuente de luz ALS [15].

| | |
|------------------------|--------|
| Campo Magnético Máximo | 0.64 T |
| Longitud de Periodo | 16 mm |
| Número de Periodos | 20.5 |
| Fuerza Magnética K | 0.96 |

La brillantez que se podría obtener de este Ondulador Super-conductor, con los parámetros del sincrotrón para México, para los armónicos 1 hasta el 11 se muestra en la figura 9.

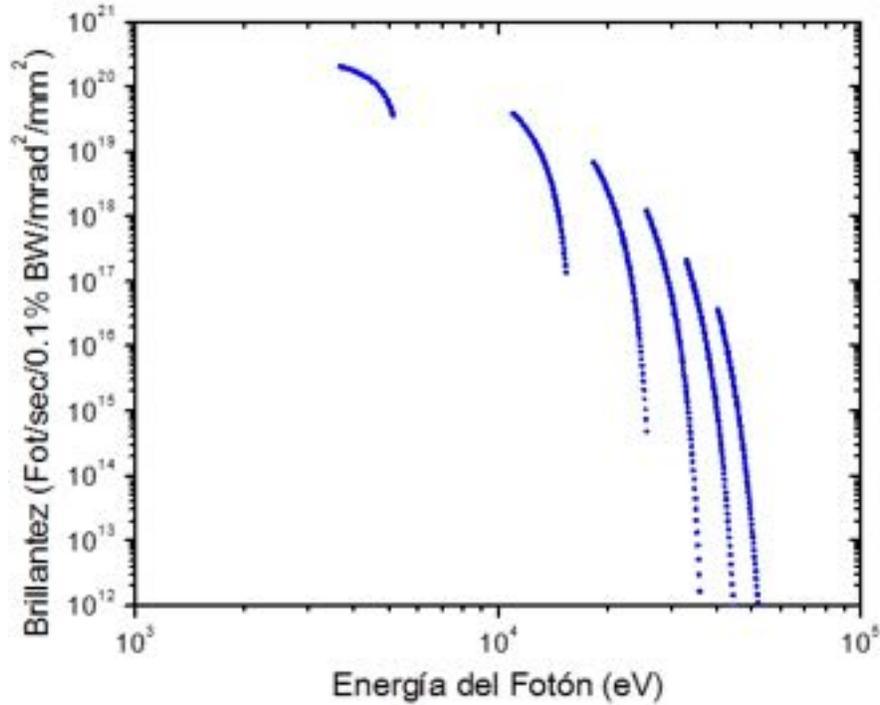


Figura 8. Brillantez de los armónicos de un SCU en función de la energía del fotón, para los parámetros del proyecto Mexicano (Tabla 2) [22].

Espectro CPMU

En el caso de un Ondulador criogénico de imanes permanentes (CPMU) se podría utilizar uno parecido al prototipo desarrollado en Alemania como una colaboración del HZB y el departamento de física experimental de la Universidad de Hamburgo (UHH) [19]. Es ésta se construyó un CPMU de $(Nd_{0.2}Pr_{0.8})_2Fe_{14}B$ el cual tiene las especificaciones que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones del prototipo CPMU desarrollado en el HZB y la UHH [19].

| | 300 K | 25 K |
|------------------------|---------|---------|
| Campo Magnético Máximo | 0.996 T | 1.149 T |
| Longitud de Periodo | 9 mm | |
| Número de Periodos | 20 | |
| Fuerza Magnética K | 0.837 | 0.966 |

La brillantez que se podría obtener de este CPMU, con los parámetros del sincrotrón para México, para los armónicos 1 hasta el 11 se muestra en la figura 9, en la figura 10 se muestran las brillanteces de las fuentes de luz sincrotrón que se analizaron en este trabajo.

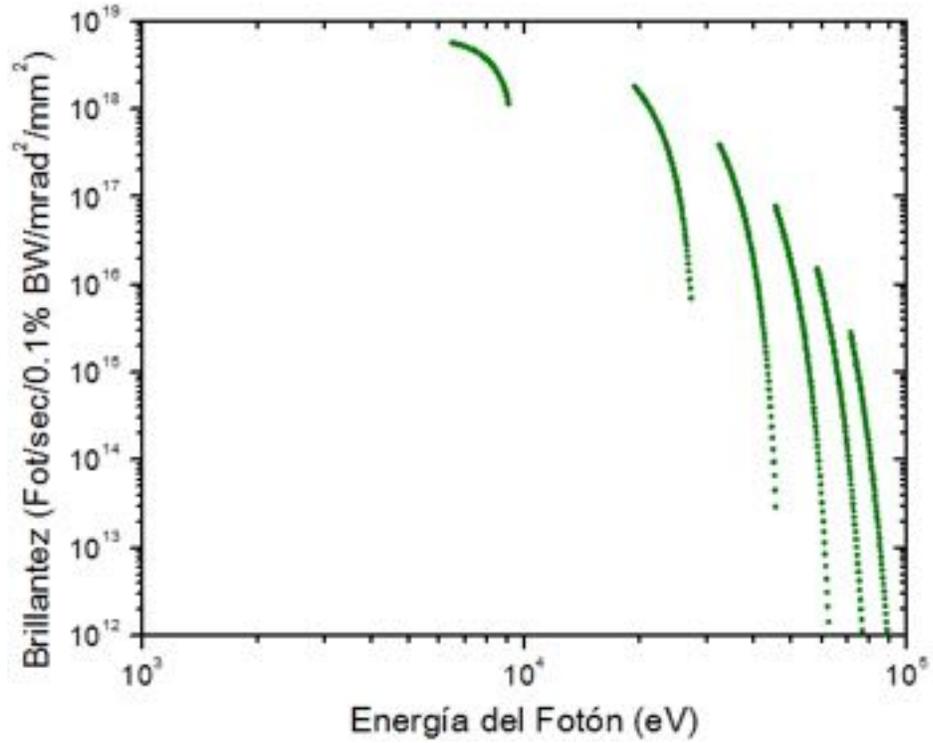


Figura 9. Brillantez de los armónicos de un CPMU en función de la energía del fotón, para los parámetros del proyecto Mexicano (Tabla 2) [22].

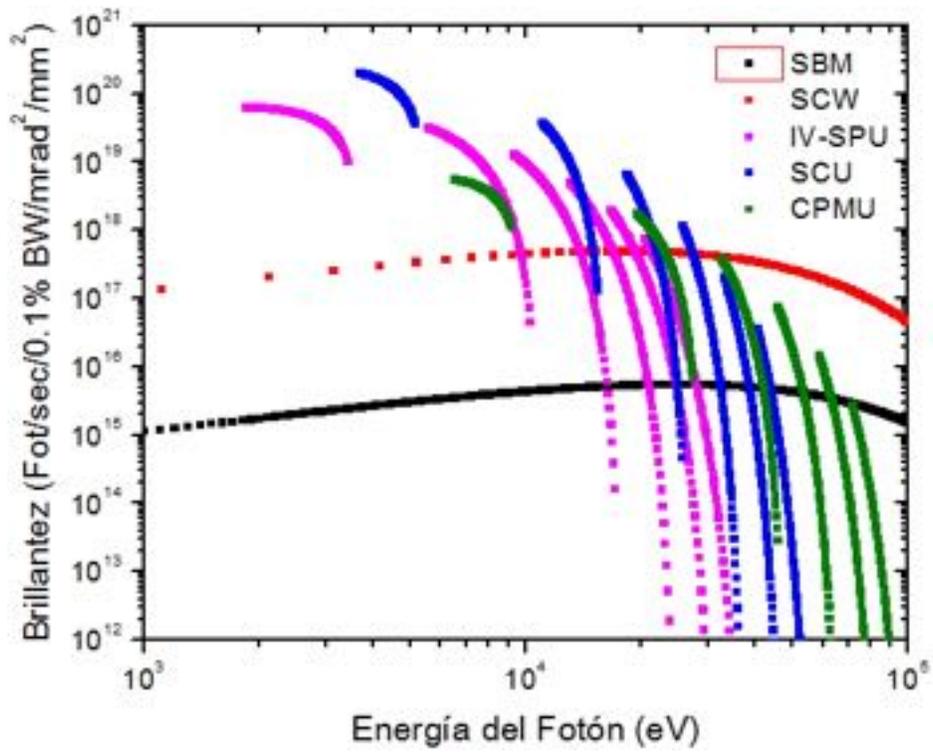


Figura 10. Brillantez de las diferentes fuentes de luz sincrotrón que se analizaron en este trabajo [22].

Conclusiones

Se realizó un estudio de las diferentes fuentes de luz sincrotrón que pueden servir para obtener rayos X duros del presente diseño del anillo de almacenamiento, perteneciente al proyecto del sincrotrón Mexicano. Según las características encontradas y los cálculos que se realizaron, se puede concluir que la energía del haz de partículas del presente diseño es la suficiente para tener una o varias fuentes de rayos X duros en el sincrotrón de México.

En la figura 10 se puede apreciar claramente que el intervalo de rayos X duros puede ser cubierto por los diferentes dispositivos. Se deben de tener en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno de éstos, y la elección del tipo de fuente dependerá totalmente de las especificaciones de los experimentos que sean llevados a cabo en la *beamline*.

Bibliografía

- [1] Z.T. Zhao, *Storage Ring Light Sources*, Reviews of Accelerator Science and Technology Vol. 3, 57, World Scientific Publishing Company (2010).
- [2] W. A. Barletta, H. Winick, *Introduction to special section on future light sources*, Nucl. Instrum. Methods A 500, 1 (2003).
- [3] J. Corbett, T. Rabedeau, *Intermediate-energy light sources*, Nucl. Instrum. Methods A 500, 11 (2003).
- [4] H. Onuki, P. Elleaume, *Wigglers, Undulators and their Applications*, Primera Edición, Taylors and Francis, USA, Canada (2003).
- [5] L. Liu, X. R. Resende, R. D. Rodrigues, *SIRIUS (BR): A new Brazilian Synchrotron Light Source*, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2481 (2010).
- [6] Tian Shun-Qiang et al., *Lattice design and optimization of the SSRF storage ring with super-bends*, Nucl. Science and Tech. 25, 010102 (2014).
- [7] S. Khruchehev, et al., *Superconducting Multipole Wigglers: State of Art*, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 4103 (2014).
- [8] J. Chavanne, P. Van Vaerenbergh, P. Elleaume, *A 3 T asymmetric permanent magnet wiggler*, Nucl. Instrum. Methods A 421, 352 (1999).
- [9] C.S. Hwang, J.C. Jan, S.D. Chen, C.H. Chang, and T.M. Uen, *Development trends for insertion devices of future synchrotron light sources*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 044801 (2011).
- [10] B. A. Peterson et al., *Technology development for short-period magnetic undulators*, Physics Procedia 52, 36 (2014).
- [11] I. Ben-Zvi, Z.Y. Jiang, G. Ingold, L.H. Wu, *The performance of a superconducting micro-undulator prototype*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 297, 301 (1990).
- [12] H.O. Moser, B. Krevet, H. Holzapfel, Research Center Karlsruhe, German Patent No. DE 4101094.
- [13] J. Bahrtdt, Y. Ivanyushenkov, *Short Period Undulators for Storage Rings and Free Electron Lasers*, J. Phys.: Conf. Ser. 425, 032001 (2013).

- [14] S. Casalbuoni, M. Hagelstein, B. Kostka, R. Rossmanith, *Generation of x-ray radiation in a storage ring by a superconductive cold-bore in-vacuum undulator*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 010702 (2006).
- [15] Y. Ivanyushenkov, et al., *Development and operating experience of a short-period superconducting undulator at the Advanced Photon Source*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 040703 (2015).
- [16] T. Hara, T. Tanaka, H. Kitamura, T. Bizen, X. Maréchal, T. Seike, T. Kohda, Y. Matsuura, *Cryogenic permanent magnet undulators*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 7, 050702 (2004).
- [17] C. Benabderrahmane, M. Valléau, P. Berteaud, K. Tavakoli, J.L. Marlats, R. Nagaoka, N. Béchu, D. Zerbib, P. Brunelle, L. Chapuis, D. Dallé, C. Herbeaux, A. Lestrade, M. Louvet, M.E. Couprie, *Development of a 2 m Pr₂Fe₁₄B Cryogenic Permanent Magnet Undulator at SOLEIL*, J. Phys.: Conf. Ser. 425, 032019 (2013).
- [18] J. Chavanne, M. Hahn, R.Kersevan, C.Kitegi, C.Penel, F.Revol, *Proceeding of EPAC Conf.*, Genova, Italy, 2243 (2008).
- [19] F. Holy, A. R. Maier, B. Zeitler, R. Weingartner, S. Raith, N. Kajumba, M. El Ghazaly, W. Lauth, D. Krambrich, A. Gaupp, M. Scheer, J. Bahrtdt, F. Grüner, *First spectral measurements of a cryogenic highfield short-period undulator*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 050704 (2014).
- [20] F.H. O'Shea, G. Marcus, J. B. Rosenzweig, M. Scheer, J. Bahrtdt, R. Weingartner, A. Gaupp, F. Grüner, *Short period, high field cryogenic undulator for extreme performance x-ray free electron lasers*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 070702 (2010).
- [21] M. Sanchez del Rio, R.J. Dejus, *Status of XOP: an x-ray optics software toolkit*, SPIE Proceedings Vol. 5536, 171 (2004).
- [22] O. Chubar, P. Elleaume, *Accurate And Efficient Computation Of Synchrotron Radiation In The Near Field Region*, Proc. of the EPAC98 Conference, 1177 (1998).
- [23] D. Robin, et al., *Successful Completion of the ALS Superbend Project*, Proceedings of EPAC 2002, Paris, Francia, 215 (2002).
- [24] L. Tosi, C. Knapic, D. Zangrando, *The Elettra Superconducting Wiggler*, Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 390 (2004).



PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

Guía Básica Para Modelado de Imanes con Software Opera 3d

MCF Héctor Domínguez Sotelo

MODELADO DE IMAES CON OPERA- 3d

INTRODUCCIÓN

OPERA-3d es el sistema pre y pos-procesador para programas de análisis electromagnético, estos incluyen: **TOSCA, ELEKTRA, SCALA, CARMEN, SOPRANO y TEMPO.**

La **discretización** de la geometría del problema es llevada a cabo con **Elemento Finito** (método usado para resolver ecuaciones diferenciales parciales) es la base de los métodos usados por estos programas.

Implementación

El software Opera 3d puede ser usado en PCs o en estaciones de trabajo, y pueden emplearse varios sistemas operativos. Cada sistema tiene una forma diferente en la cual el programa debe instalarse y ejecutarse. (Ver guía de usuario)

La filosofía del programa es que se pueden realizar diseños de modelos usando el modelador geométrico, y en el pre-procesador que incluye un generador de **retícula (malla)** y la definición de los materiales, y los resultados computados pueden verse y procesarse en el pos procesador.

Director de Opera (Opera Manager), Optimizador (Optimizer) y Permisos (Licencing)

Todos los programas contenidos en el Sitio de Opera se pueden iniciar usando el Director de Opera (Opera Manager) el cual es un buscador avanzado de archivos que reconoce los tipos de archivos creados por Opera y contiene los menús, barras de herramientas para acceder todos los programas, opciones, Guías de Usuario y manuales de Referencia.

El director de Opera incluye el **Optimizador** que se usa para correr múltiples diseños y buscar el diseño óptimo que cumpla con el criterio especificado. Software Opera está autorizado. El Director de Opera muestra las licencias en lista, disponibles, sin embargo estas son manejadas por la Utilidad de Licencia de Opera.

Consola de opera

La Consola de Opera es el centro de navegación para el sitio completo del software de OPERA. Se inicia de la barras de menús como:

Start → Programs → Vector Fields OPERA → OPERA 10.0

Alternativamente, se puede iniciar a partir del ícono  de la bandeja del sistema. Checar guía de usuario para ver las operaciones que permite.

Menú Tabulado de la Interface del Modelador de Opera 3d

Este menú Tabulado tiene 3 Etiquetas de comandos:

- 1.- Work:** contiene comandos para abrir y salvar archivos, historia, variables definidas por el usuario y visualizador.
- 2.- Diseñador:** contiene comandos para crear, modificar y manipular modelos.
- 3.- Análisis:** contiene para definir análisis de datos específicos, generar la retícula (malla) y crear bases de análisis de datos.

Menú Tabulado de la Interface del Post procesador de Opera 3d

Este menú tabulado contiene 2 etiquetas de comandos:

- 1.- Work:** contiene comandos para acceso de base de datos, variables definidas por el usuario, visualización de modelo, opciones globales y unidades.
- 2.- Post-procesador:** contiene comandos para visualizar resultados y derivar más información .

Generalidades

Programas de apoyo para OPERA 3d

Los programas **Modelador Geométrico (Geometric Modeller OPERA 3d)** y **pre-procesador OPERA 3d** le dan soporte a OPERA 3d para la creación de modelos con elemento finito.

El manual de usuario de OPERA-3d explica en detalle las características que debe cumplir la máquina donde se va a instalar el programa y cómo correr los programas OPERA Pre y Pos Procesador que constituyen el Modelador Geométrico.

OPERA 3d **pos-procesador** proporciona los elementos necesarios para calcular campos electromagnéticos. Además hace un despliegue de gráficas y mapas de contorno del campo. Puede calcular y desplegar muchas cantidades derivadas así como dibujar trayectorias de partículas a través de campos magnéticos calculados.

El programa de análisis TOSCA resuelve problemas de campo no lineal magnetostático y electrostático y problemas de flujo de corriente, en tres dimensiones. ELEKTRA hace análisis de campos electromagnéticos dependientes del tiempo, calcula corrientes de Eddy, en tres dimensiones. SCALA analiza campos electrostáticos que consideran los efectos de carga espacial generados por haces de partículas cargadas. CARMEN analiza campos electromagnéticos transitorios en máquinas rotatorias, con rotor a velocidad constante. SOPRANO analiza campos electromagnéticos de alta frecuencia en tres dimensiones. TEMPO analiza campos térmicos en estado estacionario o transitorio, que surgen como resultado de calentamiento electromagnético y otras fuentes externas de calor.

El Modelador Geométrico interactivo, pre y pos procesador de OPERA 3d tiene una interface de usuario que cuenta con una línea de comandos y una interface gráfica de usuario.

OPERA-3d contiene dos módulos para generar archivos de datos y crear modelos para los programas que realizan el análisis electromagnético. El Modelador usa volúmenes geométricos **primitivos** (ver manual de usuario) y operaciones del álgebra Booleana para construir el modelo, mientras el pre-procesador emplea extrusión de una sección transversal en 2D. Ambos módulos le permiten al usuario crear la retícula (malla) para el elemento finito,

especifican la geometría del conductor y definen las características del material.

El **manual de referencia** OPERA 3d contiene información detallada de los comandos usados en OPERA 3d.

Opera-3d emplea una **base de datos binaria**, que puede ser creada por el pre-procesador y por el Modelador. Esta base es accesada por los módulos de análisis y el pos-procesador.

Su estructura se basa en almacenar datos para la geometría de un modelo, y luego genera un número de simulaciones. No necesita de archivos adicionales de datos, es autónoma (tablas **BH** y demás, ya están incorporadas en la base de datos).

Correr una simulación en OPERA 3d consiste en emplear la geometría contenida en la base de datos y correr uno de los módulos de análisis. Esto es, después de que se cuenta con la geometría se sigue la simulación con TOSCA, o ELEKTRA, etc.

La base de datos usa solo un conjunto de **unidades (cgs, SI)**, no se pueden tener unidades diferentes para cada simulación en la misma base de datos. Los devanados y las condiciones a la frontera requieren de **etiquetas** (ver guía de usuario de Opera 3d).

Las propiedades del material: en los módulos de análisis, excepto en SOPRANO y ESCALA, se cuenta con material no lineal y anisotrópico.

La paquetería OPERA 3d cuenta con la característica de generación automática de **mallado tetraédrico**. Es la única clase de mallado disponible en el Modelador. En el pre-procesador es posible construir modelos en elementos de bloques **hexaédricos** y tetraédricos.

Para lograr una precisión alta en el campo es necesario alinear los bordes de los elementos con las líneas equipotenciales.

Si se requiere mayor precisión se deben generar **mallados hexaédricos**, sin embargo la generación automática de tetraedros impide que los bordes tengan alineación adecuada, esto introduce errores.

Para problemas que requieran alta precisión se deben considerar elementos hexaédricos.

El pre procesador contiene un concepto útil para crear retículas conocido como **plano base** que es creado a partir de polígonos. El plano base es **extruido** para formar volúmenes.

Es necesario crear la retícula en el pre-procesador, y se hace en dos etapas: primero se crea una **mallado de superficie** seguida de una **mallado volumétrica**.

Si solo se usan caras con 3 ó 4 lados en el plano base, la mallado de la superficie es cuadrilátera- esto va generar una mallado volumétrica hexaédrica.

Si es una faceta poligonal entonces se genera una **mallado triangular** superficial, y el volumen se basará en una mallado tetraédrica.

En el Modelador se construye el modelo usando volúmenes primitivos, superficies barridas y operaciones Booleanas. Las superficies de volúmenes (**celdas**) son discretizadas en triángulos.

Usando la mallado de la superficie, cada celda es completada con tetraedros. Se puede definir el tamaño máximo del elemento en los vértices, bordes, caras o celdas dentro de un modelo.

Esto permite tener una concentración de reticulado en áreas de interés.

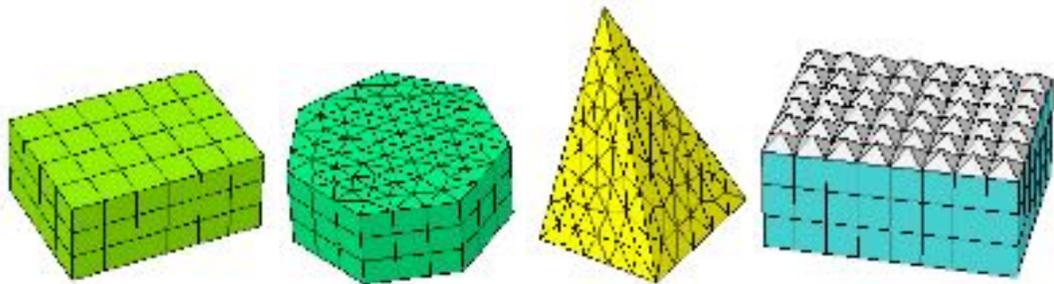


Tabla 1.- Tipos de elementos de retículas

Programas de análisis –Opera-3d

Opera contiene 9 programas de análisis, de estos por el momento nos enfocaremos solo en 2.

Conviene recordar que los campos eléctricos y magnéticos al pasar de una región a otra entre dos diferentes medios tienen cierto comportamiento dado por las condiciones de contorno o a la frontera, estas se muestran en la Tabla 2.

| Campo Magnético | Simetría del Campo | Potencial Escalar |
|---|------------------------------------|--|
| TANGENCIAL MAGNETICO | $\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$ | $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ |
| NORMAL MAGNÉTICO | $\mathbf{H} \times \mathbf{n} = 0$ | $\phi = \text{constante}$ |
| Campos eléctricos o Flujo de corriente | Simetría del Campo | Potencial Escalar |
| TANGENCIAL ELECTRICO | $\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} = 0$ | $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ |
| NORMAL ELECTRICO | $\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0$ | $V = \text{constante}$ |

Tabla 2. Condiciones a la frontera de los vectores campo **E** y **H**.

Magnetostática, Electrostatica y Flujo de Corriente

Programas para resolver campos electrostáticos o magnetostáticos no lineales y flujo de corriente, en tres dimensiones. Su construcción es una formulación con base en potenciales escalares reducidos y totales.

El programa para análisis magnetostático puede calcular fuentes del campo de corrientes en bobinas, puede importar fuentes de otro análisis.

- **Magnetización**

Calcula la magnetización de materiales magnéticos permanentes por campos electromagnéticos variables en el tiempo en tres dimensiones; calcula corrientes de Eddy.

Modelado Geométrico

Esta operación emplea una topología de referencia basada en los siguientes términos:

Vertex: Es un punto en el espacio definido por su posición en un sistema cartesiano de coordenadas.

Edge: Es una simple línea en el espacio, tiene dos vértices definiendo sus bordes.

Face: Un conjunto de edges , conectados en sus bordes, forman un lazo. Para la mayoría de los casos, ese lazo forma la frontera de una cara.

Cell: Es un conjunto cerrado de caras conectadas en los límites de sus bordes formando un cascarón. Una cell puede representar un volumen encerrado del espacio limitado por uno o más cascarones.

Body: Es una colección de las entidades de arriba.

Creando nuevos objetos

Los comandos básicos **primitivos** existen para crear objetos. Los tipos de objetos que pueden ser creados son: **Bloques, Cilindro, Cono, Cilindro elipsoide, Esfera, Toro, Prismas Regulares de n lados y Pirámides.**

Para crear conjuntos de conductores se emplean los comandos **RACETRACK, BEDSTEAD.**

Una vez creados se pueden modificar y ser seleccionados de dos maneras posibles

- Interacción gráfica
- Seleccionándolos de acuerdo a sus atributos asociados

El comando para **modificar** la geometría es **TRANSFORM.** Las transformaciones disponibles son:

TRASSLATION, ROTATION, REFLECTION, SCALE.

Objetos complejos

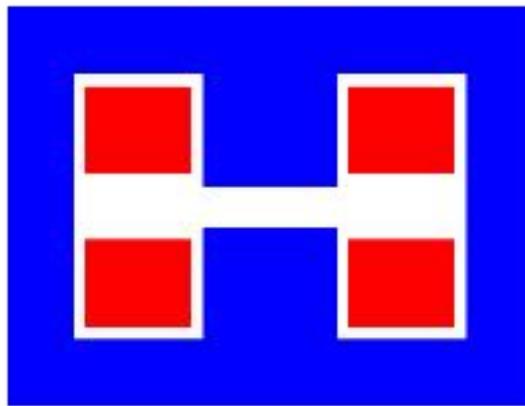
Estructuras complejas se llevan a cabo con operaciones Booleanas sobre 2 ó más cuerpos usando el comando **COMBINE**. Las operaciones Booleanas son: **UNION, INTERSECTION, SUBTRACTION, TRIM, CUTAWAY**. Para estas tres últimas el orden en la selección es importante.

SIMULACIONES

Guía rápida general para hacer un modelo con Elemento Finito

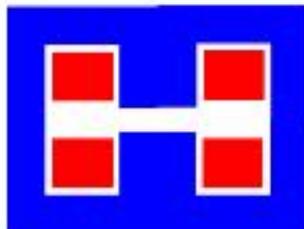
Se muestra a continuación una secuencia de pasos simples para elaborar un modelo de imán con elemento finito. Lo primero es tener la geometría del problema a analizar. *Ejemplo:*

Geometry



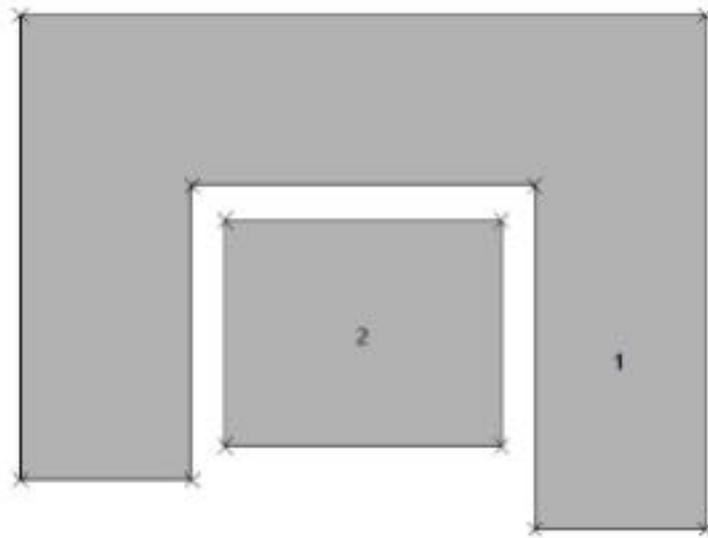
1.- Reducir el modelo tomando ventaja de la simetría

General guideline for FE models

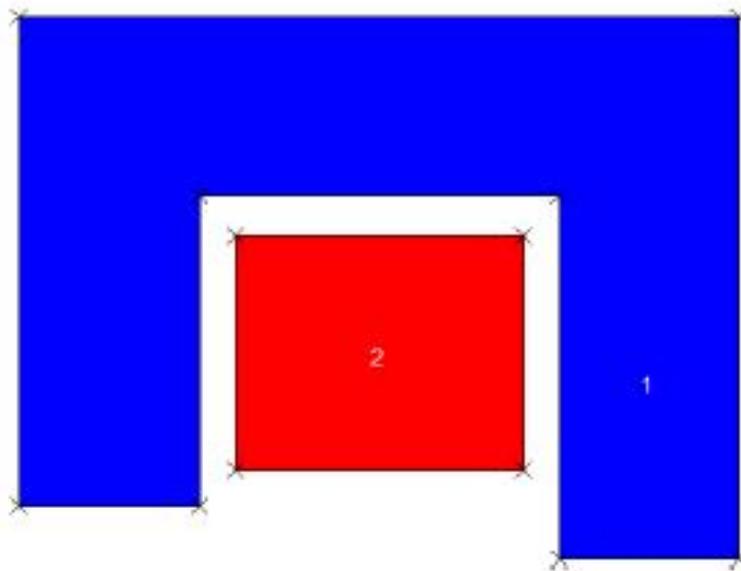


1) Reduce the model taking advantages of the symmetries

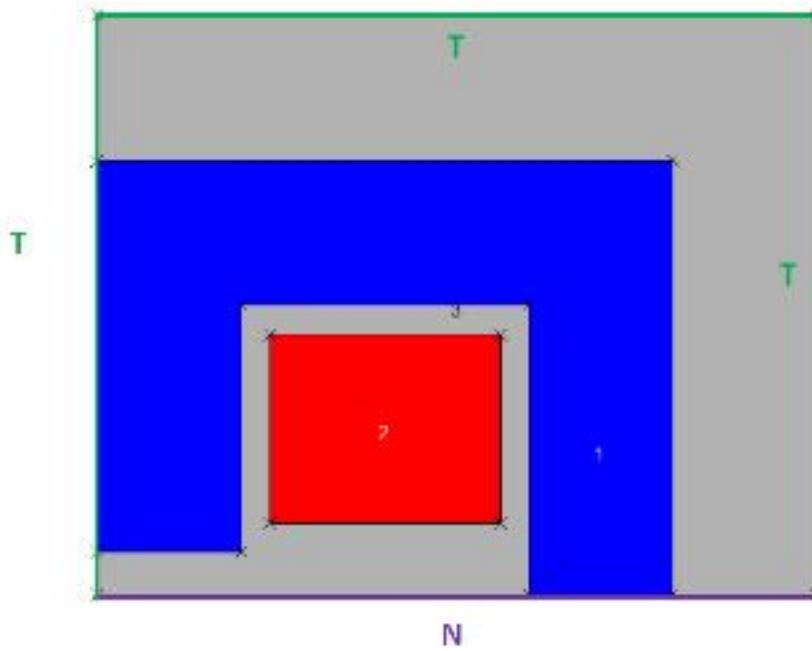
2.- Definir regiones de simetría



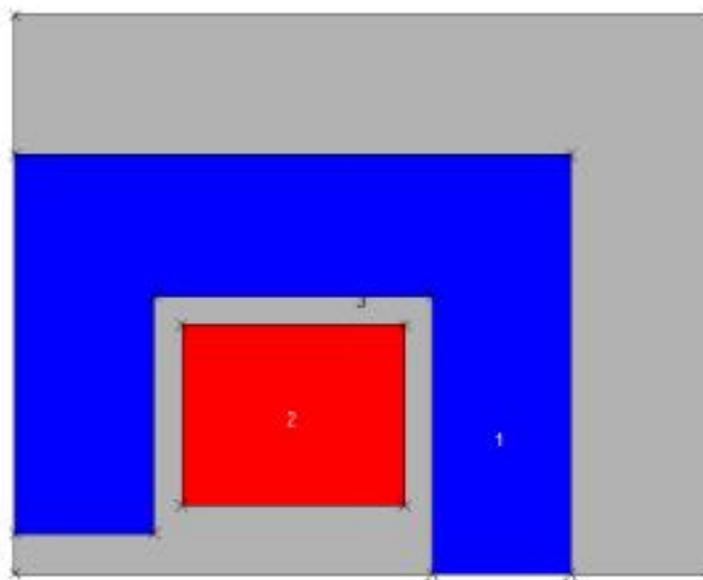
3.- Definir regiones de acuerdo a las propiedades de los materiales



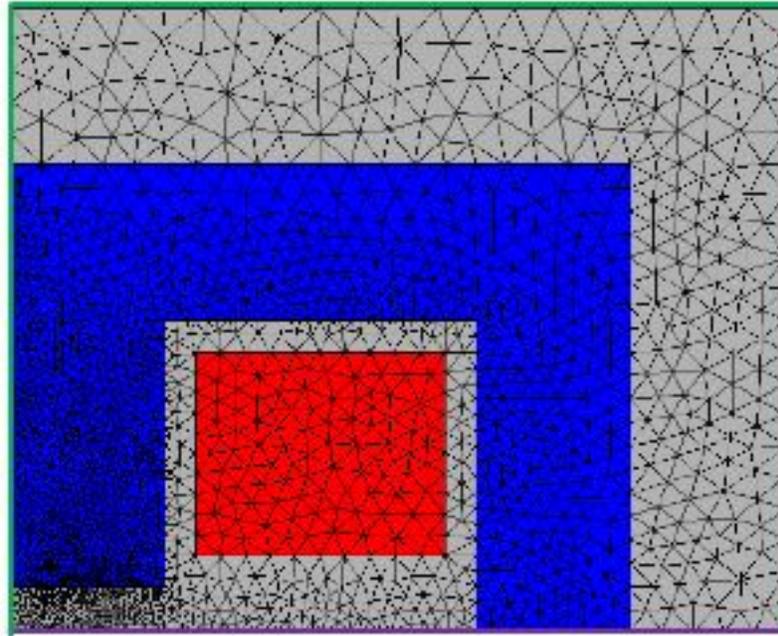
4.- Definir el universo



5.- Definir condiciones a la frontera



6.- Definir/redefinir la retícula



7.- Fijar detalles de la simulación- criterio de convergencia

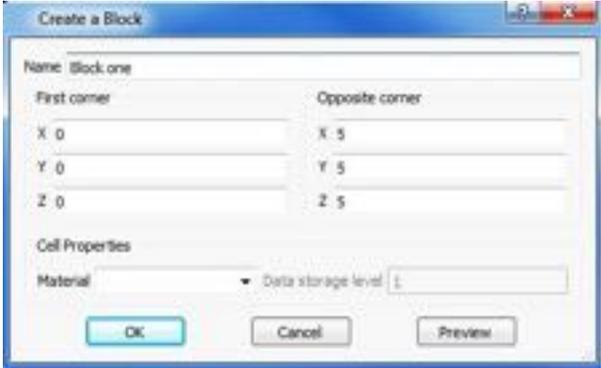
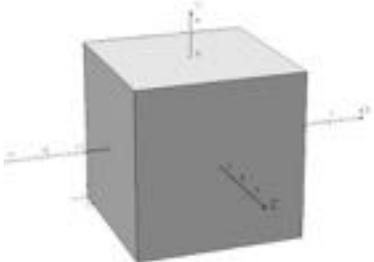
Sugerencias: Una vez terminado el diseño es conveniente hacer una revisión

- Revisar las unidades, ser consistente con éstas.
- Revisar condiciones a la frontera
- Revisar polaridad de las bobinas
- Revisar propiedades de los materiales
- Estimar el resultado y compararlo para ver si es correcto
- Optimizar retícula para refinar resultados
- Si es posible, simplificar el modelo para quitar detalles innecesarios
- Consultar manual / archivo de ayuda

Bocetos de formas primitivas

Para la elaboración de modelos empleando **modelador** (Modeller), se usan formas básicas (primitivas) que son modificadas en su geometría. Hay dos maneras de definir las formas básicas; llenar la **casilla de datos** con valores apropiados para la geometría o hacer un **boceto en 2D** dibujando la forma inicial interactivamente. Se ilustra esto con un ejemplo, el boceto está basado en un plano, orientado sobre el plano local XY en el sistema coordenado de trabajo.

Ejemplo: Modelado un bloque

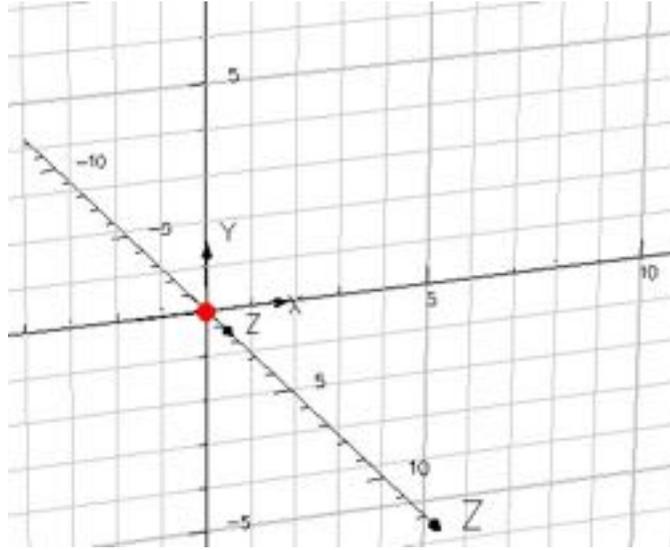
| | | |
|--|---|--|
|  Create Block | <p>Accesar coordenadas de esquinas opuestas: (0,0,0) y (5,5,5). Opcional: fijar nombre del material y nivel de almacenamiento de datos.</p>  |  |
|--|---|--|

Alternativamente se usa el boceto en 2D para dibujar la misma forma interactivamente.

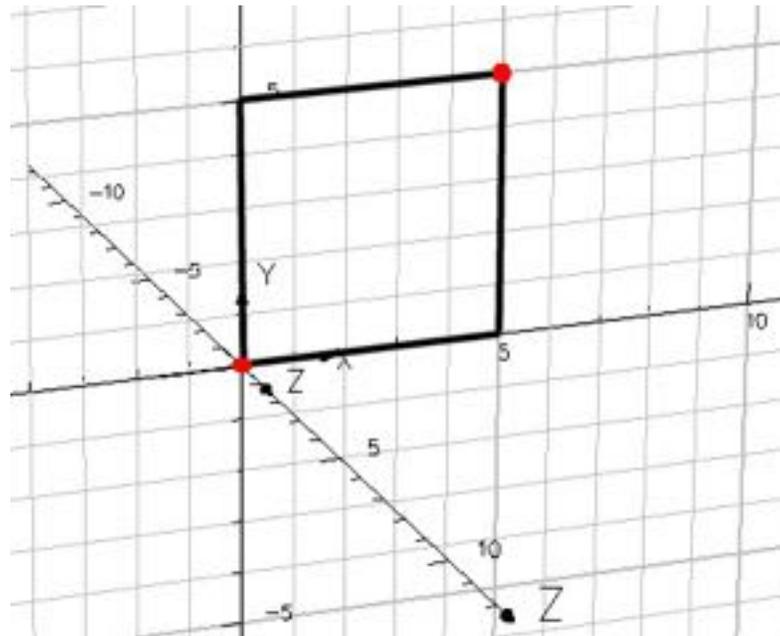
Para el modelado interactivo se debe borrar todo presionando Ctrl-Z.



Mover el cursor sobre el punto (0,0), dar doble click, con botón izquierdo, así selecciona primer punto.

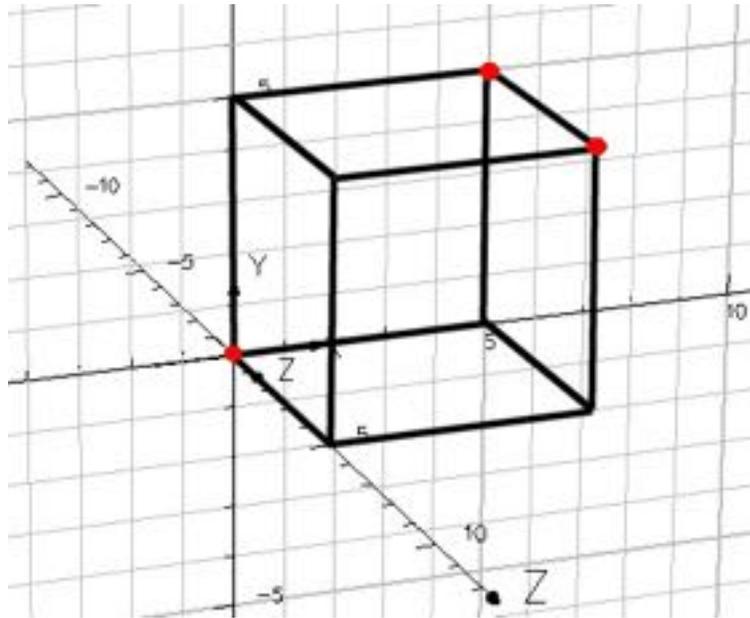


Mover el ratón hasta (5,5) de alto y dar doble click así selecciona el punto dos. Coordenadas y tamaño de área se despliegan en la parte inferior izquierda.

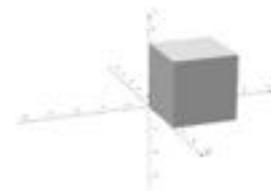
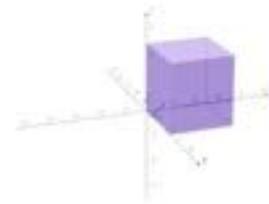
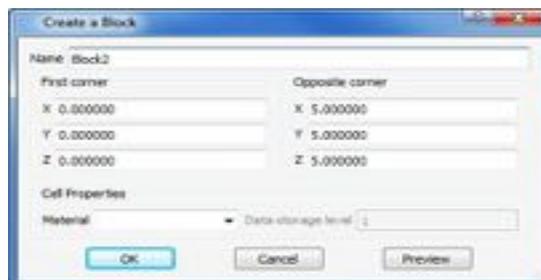


Para formar el volumen se realiza la siguiente operación

Mover el ratón a 5 de altura (en Z) dar doble click, se selecciona el punto tres.



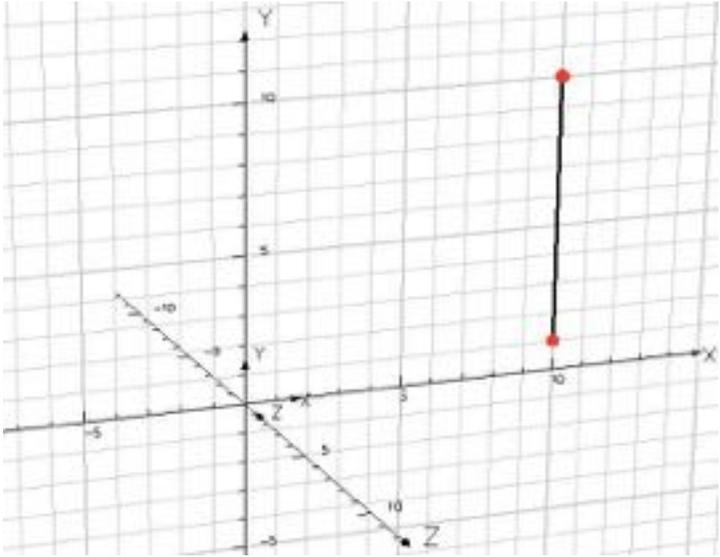
Para hacer el bloque, el cuadro de dialogo **Create a Block** aparece con las coordenadas adecuadas. Se pueden fijar el nombre de **Material** y el nivel de almacenamiento de datos (**Data Storage Level**).



Ejemplo: boceto en 2D del modelo de un núcleo-C (C-core) con bordes de alambre

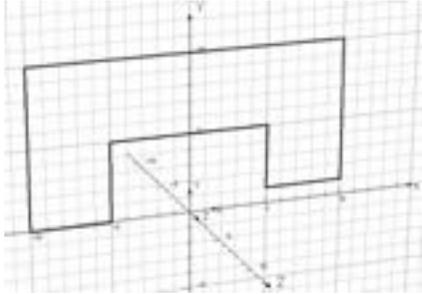
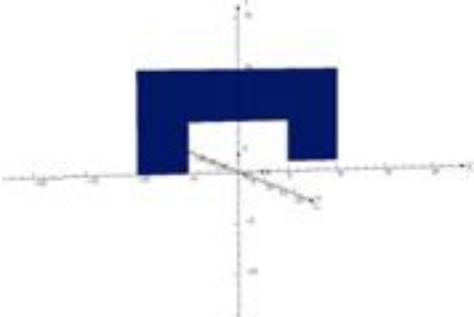
Esta es otra opción de introducir datos de geometrías

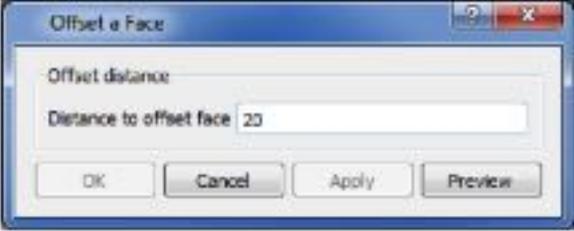
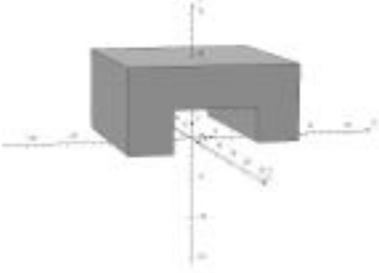
Se usa el comando **COVER** para elaborar una cara plan (hoja), sin espesor, y el comando **OFFSET** para generar el volumen. Hay que borrar todo. Luego seleccionar **Start of modelling operations**.

| | |
|--|---|
|  <p>Ensure Sketching Active is selected</p>  <p>Create Wire- Edge:</p> | <p>Marcar los puntos en las coordenadas (10,1), luego en (10,10), dar en ambos casos doble click con botón izquierdo.</p>  |
|--|---|

Sketching Active permite realizar diseños interactivamente.

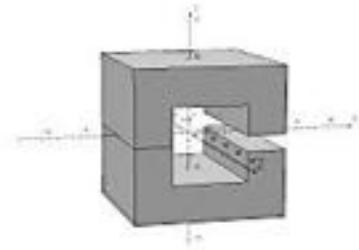
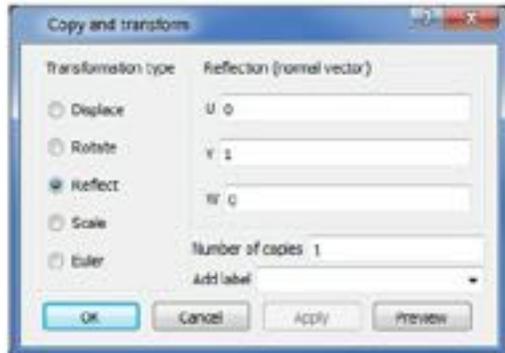
La tecla **Continue** se marca con el mouse.

| | | |
|--|--|--|
| | <p>Dar doble click sobre (-10,10) (-10,0) (-5,0) (-5,5) (5,5) (5,1)</p> |  |
| | <p>Para cerrar el polígono, doble click en el primer punto (10,1), luego presionar continue</p> |  |

| | | |
|--|--|---|
|  <p>Pick Faces</p> | <p>Mover el ratón sobre la cara. Al iluminarse ésta, dar click derecho y seleccionar  offset en el contexto del menú y dar valor de 20. Se crea un volumen.</p>  |  |
|--|--|---|



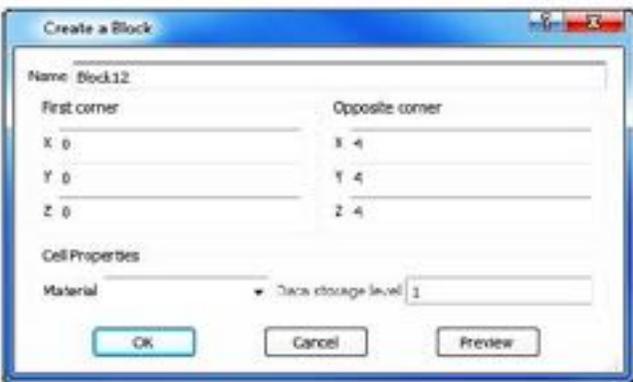
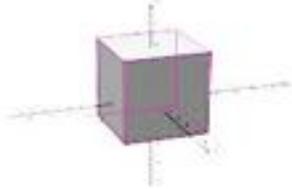
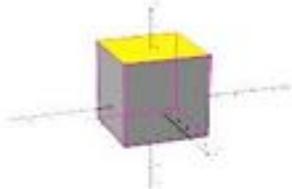
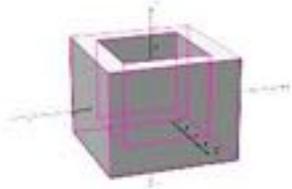
Mueva el cursor sobre el cuerpo, se ilumina y dar click derecho y elegir  **copy** del menú del contexto. Realizar una reflexión en un plano con el vector normal a la cara, en $(0,1,0)$



De esta forma se construye el núcleo-C mostrado el lado derecho.

Ejemplo de cómo emplear el comando SHELL modelando un bloque

Shell remueve caras seleccionadas, las caras restantes son barridas hacia el centro del cuerpo original, o hacia el exterior por una distancia definida.

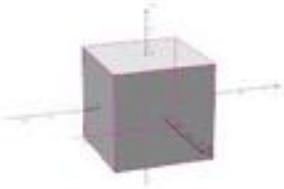
| | | |
|---|--|---|
|  <p>Create Block</p> |  <p>Create a Block dialog box showing fields for Name (Block12), First corner (X: 0, Y: 0, Z: 0), Opposite corner (X: 4, Y: 4, Z: 4), Cell Properties, Material, and Data storage level (1). Buttons: OK, Cancel, Preview.</p> |  |
|  <p>Pick Faces</p>  <p>Pick Entity</p> | <p>Seleccione una de las caras del bloque usando el boton derecho del mouse</p> |  |
|  Shell Seleccione la opción Shell en el cuadro de dialogo | | |
| |  <p>Shell a Body dialog box showing Direction (Outwards selected, Inwards), Shell thickness, and Thickness of shell (1). Buttons: OK, Cancel, Preview.</p> |  |

Chablán y Uniones (Juntas)

Mezcla y chablán son operaciones que pueden ser aplicadas en el borde de un volumen.

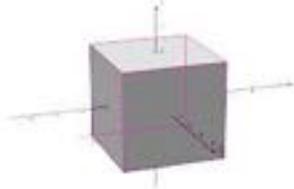
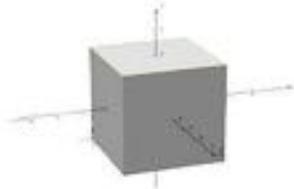
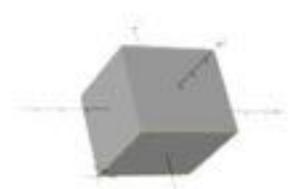
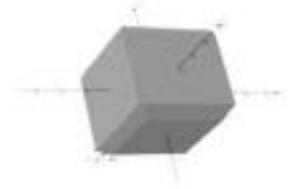
- Mezcla: aligera un borde usando un radio.
- Chablán: corta un borde usando un plano. También puede ser aplicado a un vértice.

Si las operaciones son aplicadas a un borde exterior, el material será cortado, si es en el interior, el material será añadido.

| | | |
|--|---|---|
|  Create Block | <p>Crear un bloque con esquinas opuestas en (0,0,0) y (4,4,4)</p>  |  |
|  Pick Edges Pick Entity | <p>Selecciona los 4 bordes del bloque en Y=4 Una vez seleccionados cambiarán de color</p> |  |

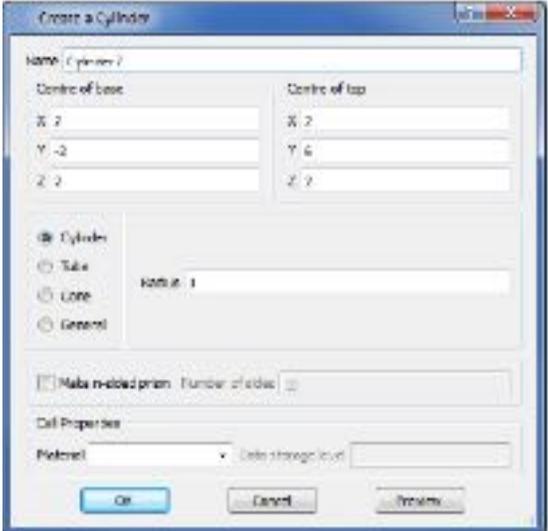
Chablán de bordes externos

El siguiente ejemplo nos ilustra cómo hacerle un chablán a la base del bloque mostrado. Se cortará una sección de 45 grados del bloque. Se puede tener un chablán asimétrico especificando diferentes valores.

| | | |
|--|--|---|
|  Create Block | Crear un bloque con esquinas opuestas en (0,0,0) y (4,4,4)  |  |
|  Pick Edges Pick Entity | Selecciona los 4 bordes del bloque en Y=4 Una vez seleccionados cambiarán de color |  |
|  Pick Entity Pick Edges | Rote el bloque usando el mouse y seleccione los bordes, una vez seleccionados cambiarán de color |  |
| Usando el botón derecho del mouse seleccione del menú: Blend or Chamfer. | | |
| | Seleccionar Chamfer e introducir una distancia de 0.4  |  |

Unión de bordes internos

Se define un cilindro que cortará por el interior del bloque, esta operación genera bordes internos que se unirán (fundirán) y se les hará un chaflán.

| | | |
|--|--|---|
|  <p>Create Cylinder</p> |  |  |
|  <p>Pick Entity Pick Bodies</p> | <p>Selecciona cilindro y bloque con el ratón. La secuencia no importa, la operación es unión, con regularización. Seleccionar Union, with Regularization, así solo una celda es creada.</p> |  |

Use botón derecho para ver menú y seleccionar:

Combine Bodies > Union, with regularization.

| | | |
|--|--|---|
|  <p>Pick Edges</p> | <p>Seleccionar borde superior. El programa selecciona el círculo completo siempre</p> |  |
|--|--|---|

Botón derecho del mouse para ver:

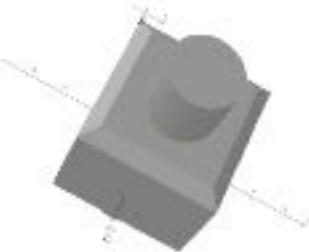


Blend Chamfer

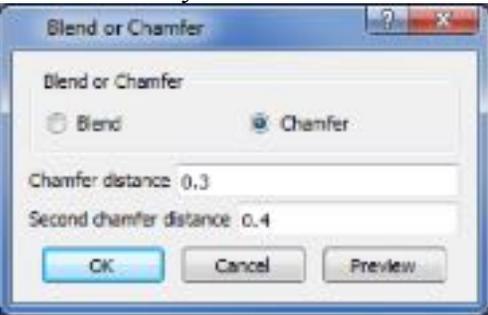
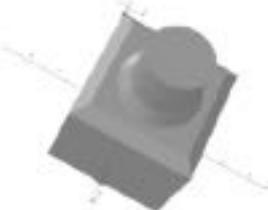
| | | |
|--|---|---|
| | <p>Crear una unión de 0.2 de radio</p>  |  |
|--|---|---|

Elaboración de Chaflán

La operación que sigue es elaborar el chaflán en la base de la unión.

| | | |
|--|---|---|
|  <p>Pick Edges</p> | <p>Marque el borde en la base del cubo.</p> |  |
|--|---|---|

Usar botón derecho del mouse y seleccionar: **Blend o Chamfer**

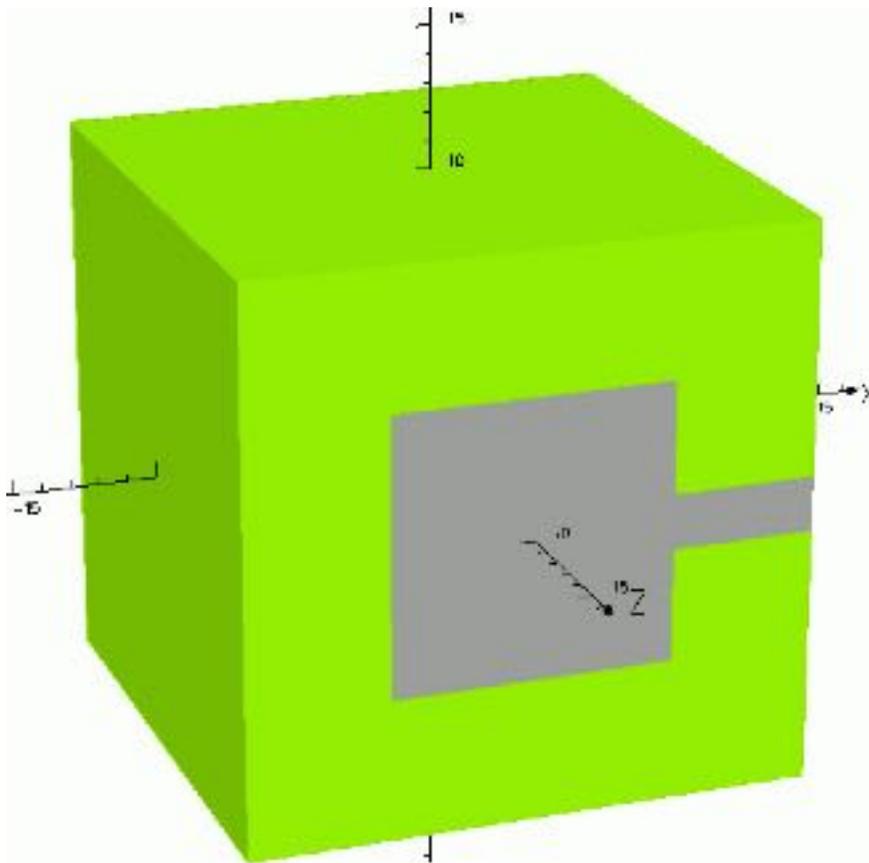
| | | |
|--|--|---|
| | <p>Crear un chaflán asimétrico con distancias 0.3 y 0.4</p>  |  |
|--|--|---|

Ejemplo de Modelaje de un núcleo-C de un electroimán

Este ejemplo es para mostrar algunas de las características del **control de la retícula** para el modelado con el uso de **elemento finito**.

Elemento finito usa el algoritmo **potencial total** ya que el campo es uniforme; elemento finito no se emplea para representar campos variables.

La siguiente figura ilustra un modelo que consta de 4 **cells**.

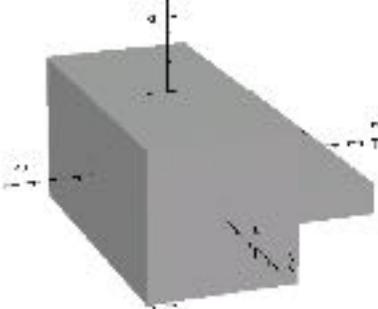
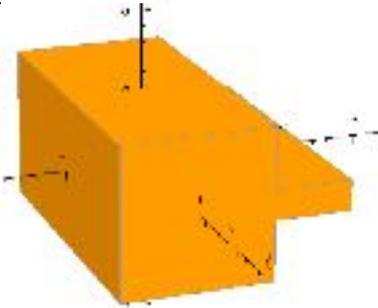


Para construirlo se crean 3 bloques, con las dimensiones siguientes:

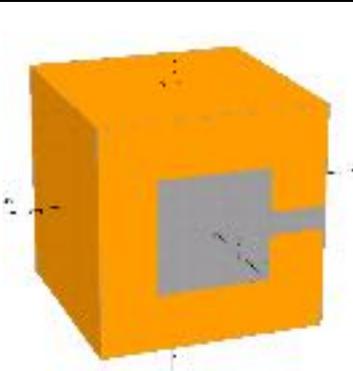
| Nombre | Primera esquina | Esquina opuesta |
|---------|-----------------|-----------------|
| Block 1 | -10,-10,-10 | 10,10,10 |
| Block 2 | -5,-5,-10 | 5,5,10 |
| Block 3 | 5,-1,-10 | 10,1,10 |

Secuencia de pasos a seguir

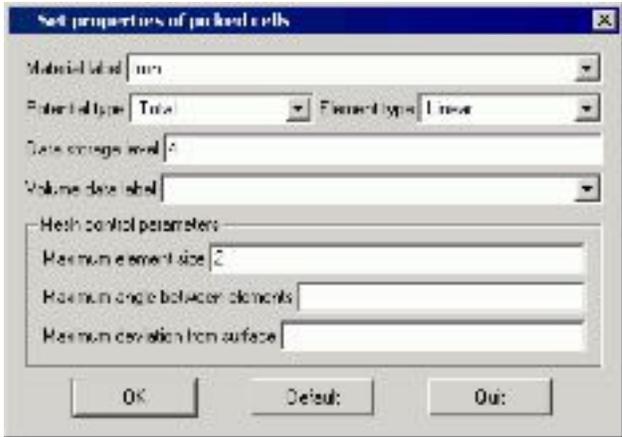
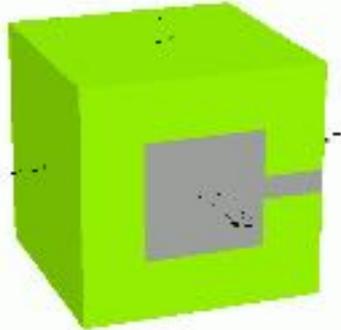
-Los bloques están unidos, se separan:

| | | |
|--|---|---|
| <p>Seleccionar Hide Entity seguido por iconos Pick Bodies</p>  | <p>Seleccionar Block 1 para Ocultarlo inicialmente</p> |  |
| <p>Seleccionar ícono Pick Entity</p>  | <p>Seleccionar Block 2 Block 3</p> |  |
| <p>Seleccionar ícono Unhide Entities</p>  | <p>No oculta al Block 1</p> |  |
| <p>Seleccionar ícono Pick Bodies</p>  | <p>Seleccionar Block 1, Blocks 2 y 3 siguen seleccionados</p> |  |

El núcleo C es ahora definido para etiqueta Iron, con **potencial total**.

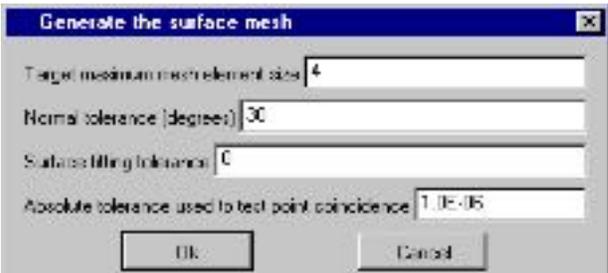
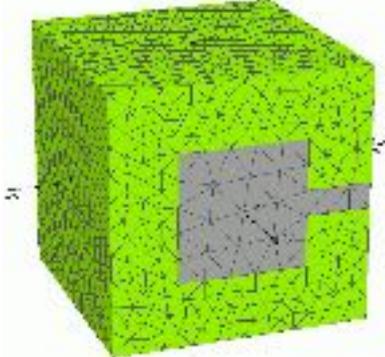
| | | |
|--|---|---|
| <p>Seleccionar Pick Cells ícono</p>  | <p>Seleccionar Block 1. Notar que hay un solo cuerpo con 3 cells. Se le pueden asignar propiedades por separado</p> |  |
|--|---|---|

Propiedades → Cell properties

| | | |
|--|--|---|
| | <p>Llenar la casilla de parámetros, fijar la etiqueta del Material, tipo de potencial, Nivel de almacenamiento de datos y el tamaño máximo del elemento</p>  |  |
|--|--|---|

Modelo → Crear modelo del cuerpo

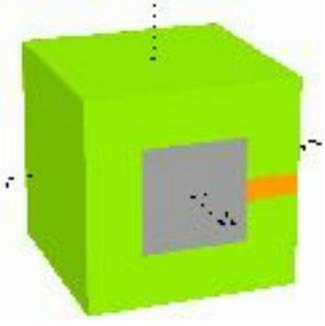
Modelo → Generar retícula de superficie

| | | |
|--|--|---|
| | <p>Seguir esta secuencia para crear la retícula de superficie. Llenar la casilla de parámetros para fijar máximo tamaño de retícula a 4</p>  |  |
|--|--|---|

Modificando las propiedades de la retícula

La malla debe ser más fina en el hierro (cerca del hueco de aire) y en gap mismo, es donde la caída de fuerza magnetomotriz es mayor. Para ello seguir la siguiente secuencia. Asegúrese que el ícono **Pick Cells**  está activo. Se recomienda borrar el cuerpo del modelo. Se pueden hacer cambios desde el modo **MODEL** pero se pierden al regresar al modo **COMPONENT**. El programa avisa si se hacen cambios en el modo **MODEL**.

Modelo → Borrar Modelo del cuerpo

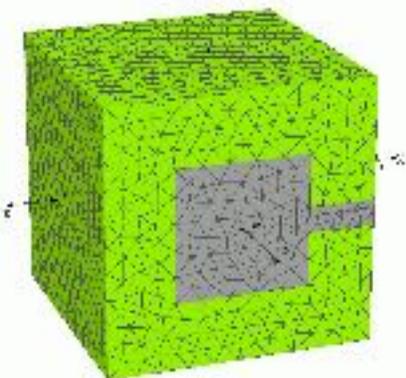
| | | |
|--|-------------------------------------|---|
| | Seleccionar Block 3, región de aire |  |
|--|-------------------------------------|---|

Propiedades → Cell properties

| | | |
|--|--|--|
| | Fijar Data Storage Level a 5, tamaño máximo de elemento a 1. | |
| | Seleccionar Block 2, hueco central de aire, fijar en cell properties el Data Storage Level a 3, tamaño máximo del elemento a 2 | |

Modelo → Crear modelo del cuerpo

Modelo → Generar la retícula de la superficie

| | | |
|--|---|--|
| | Llenar la casilla de parámetros como se muestra cuando se vaya a crear la retícula de la superficie |  |
|--|---|--|

Generate the surface mesh

Target maximum mesh element size: 4

Normal tolerance (degrees): 30

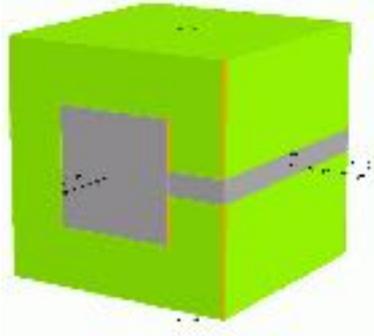
Surface filling tolerance: 0

Absolute tolerance used to test point coincidence: 1.0E-05

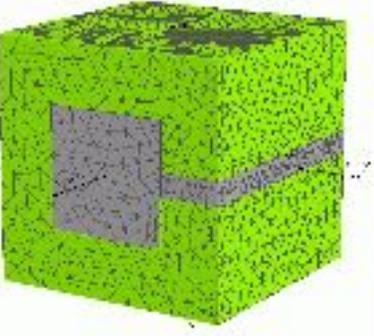
OK Cancel

Para hacer más fina la retícula, se seleccionan unos bordes, y se define una malla más fina.

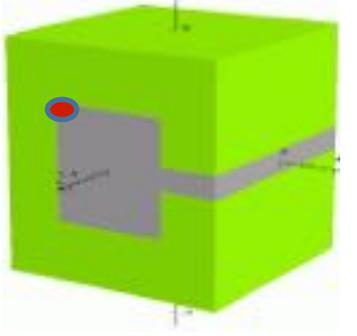
Modelo → Borrar Modelo del cuerpo

| | | |
|---|--|---|
| <p>Seleccionar ícono Pick Edges</p>  | <p>Seleccionar bordes indicados en la figura a la derecha (también bordes equivalentes en la cara oculta de la vista).</p> |  |
|---|--|---|

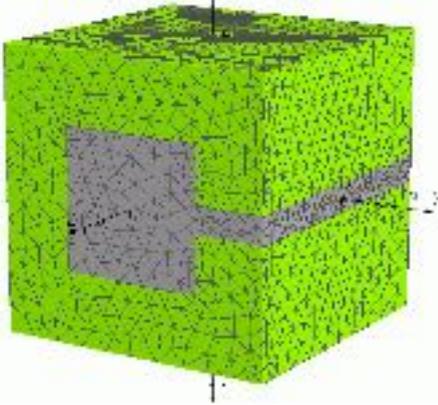
Propiedades → Edge properties

| | | |
|--|---|--|
| | <p>Fijar tamaño de retícula a 0.5, nivel de dato 4:</p>  <p>Crear la malla igual que antes se obtiene la retícula de la derecha</p> |  |
|--|---|--|

El control de retícula también se aplica a caras de las celdas y a vértices. Para refinar retícula alrededor de vértices específicos, la secuencia es:

| | | |
|--|--|---|
| <p>Seleccionar ícono Pick Vertex</p>  | <p>Elegir el vértice señalado en la figura de la derecha</p> |  |
|--|--|---|

Propiedades → Vertex properties

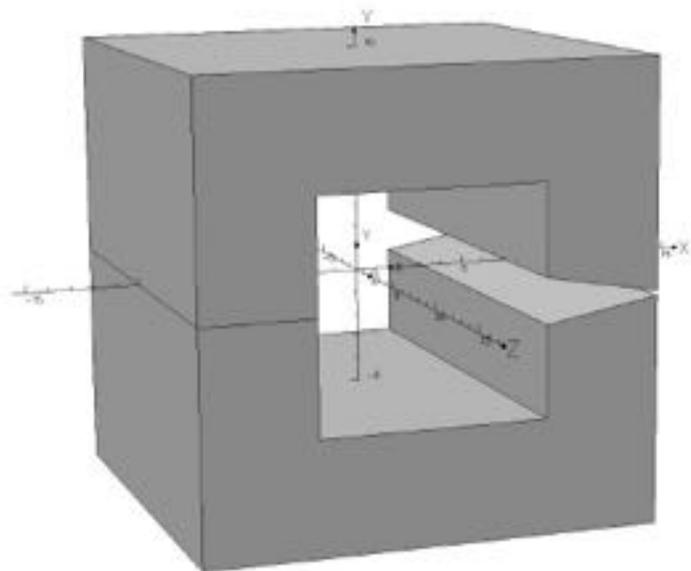
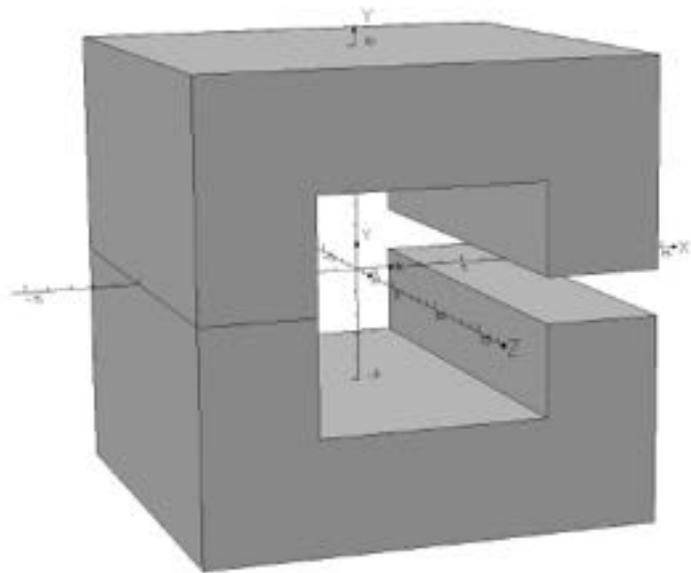
| | | |
|---|--|--|
|  | <p>Fijar el tamaño de retícula da 0.5, nivel de datos 4:</p>  <p>Repitiendo los pasos anteriores para crear la malla, se genera la retícula de la derecha</p> |  |
|---|--|--|

Se puede notar el cambio en la estructura de la retícula en la región alrededor del vértice selecto.

Guardar este archivo para aplicaciones posteriores

PARAMETRIZAR MODELOS Y RECONSTRUIR

Un modelo existente puede parametrizarse permitiendo diferentes versiones del mismo para ser recuperados fácil y rápidamente. Para mostrar las características del trabajo se toma el ejemplo Núcleo.C (C-Core) elaborado en **2D Bosquejado con bordes de alambre**. El modelo es mostrado abajo



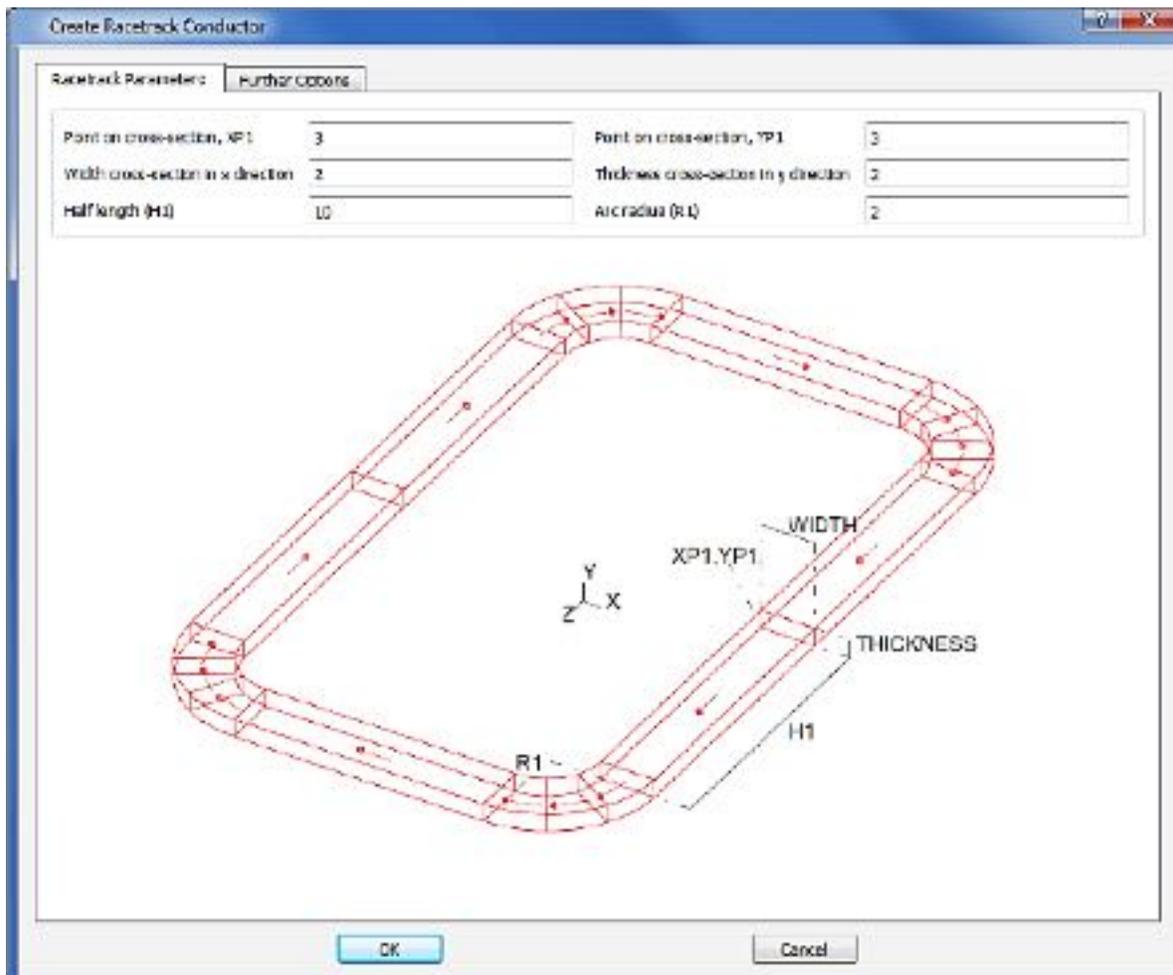
Núcleo C antes y después de cambiar coordenada

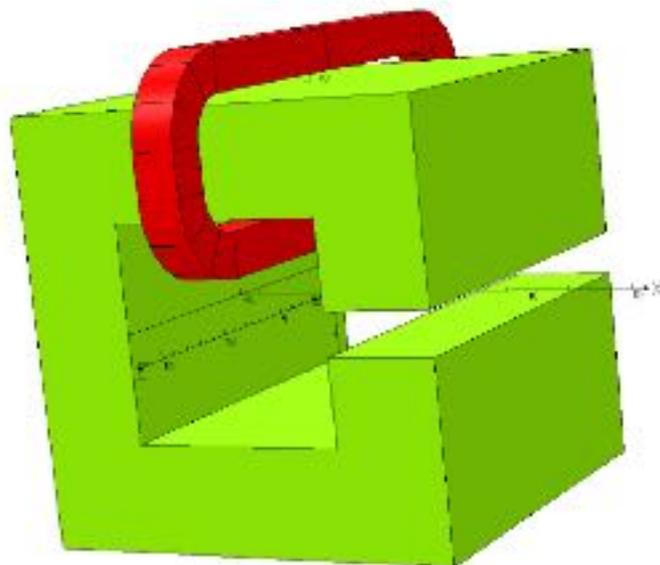
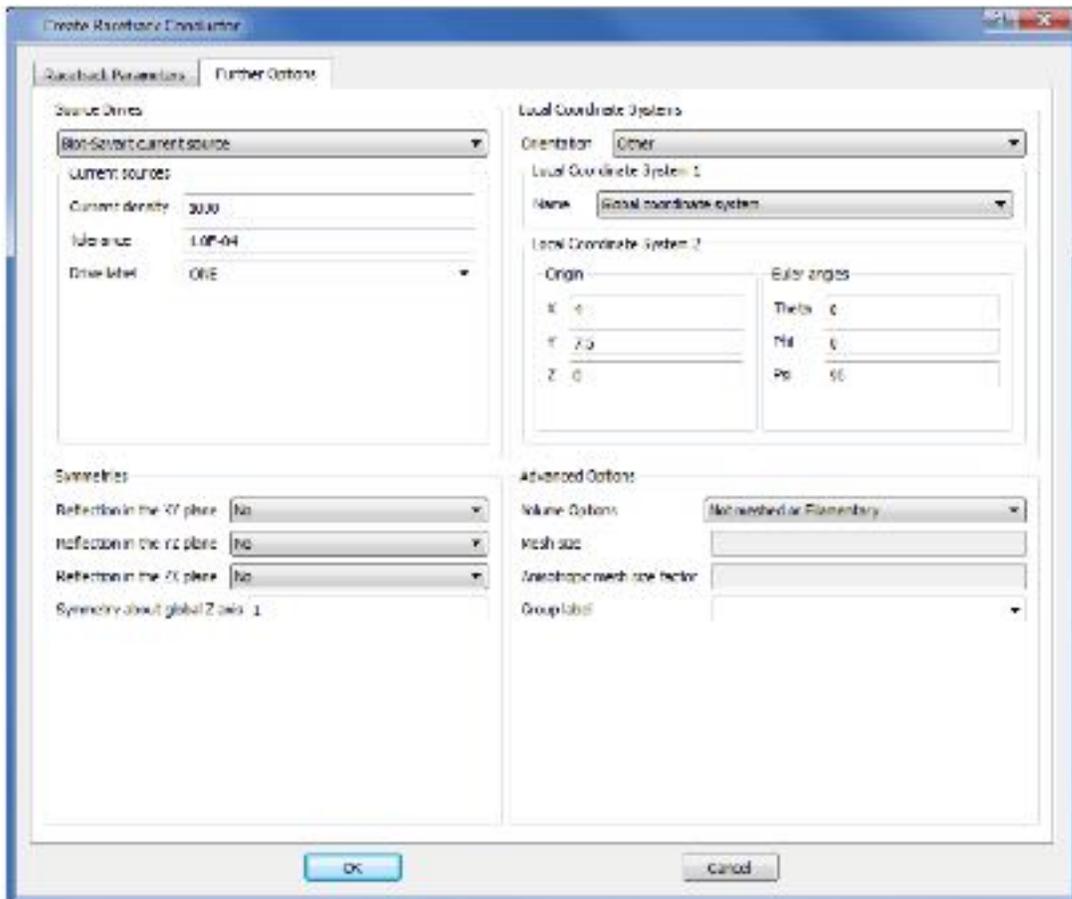
Definición y edición de conductores

El modelador tiene un rango de geometrías para conductores pre-definidas, solenoides, pistas, etc. Con formas simples se pueden construir cualquier forma de conductor.

Crear un nuevo conductor

Se define un conductor en forma de pista para el **Núcleo-C de electroimán** introducido antes, seleccionando la herramienta **Racetrack**  (toolbutton), y se debe especificar la configuración en las dos tablas de casillas de diálogo.





Guardar el modelo

Para usarse posteriormente,  Save as a New Model Data y dar nombre adecuado.

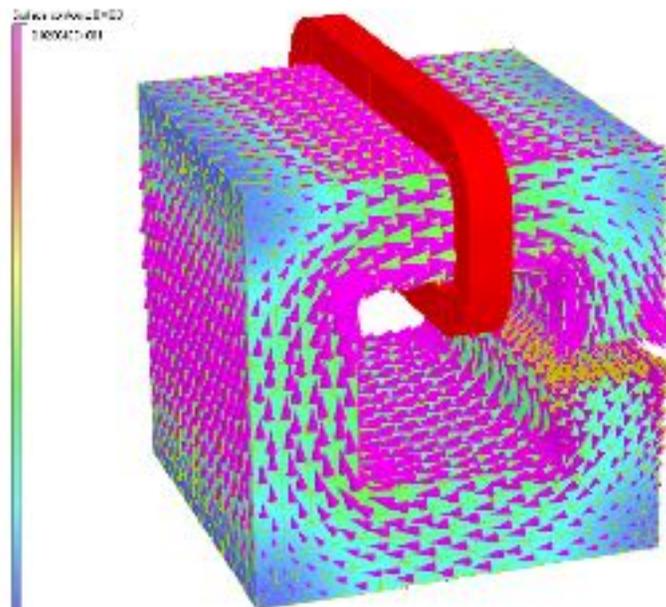
Volumen De Datos

Es útil para establecer lo siguiente:

- Orientación de imanes permanentes
- Anisotropía
- Asignación de densidad de corriente
- Velocidad
- Densidad de carga
- Fuentes de calor

Ejemplo

La asignación de propiedades anisotrópicas al núcleo de hierro-C considerado se hace definiendo una región de fondo que se extiende algunos centímetros más allá de la frontera de la región. Se muestra la distribución de la densidad de flujo en el electroimán que se calcula con Opera empleando propiedades no lineales del hierro. Una parte de permeabilidad magnética lineal relativa de 500 se introdujo para completar el modelo



Distribución de la densidad de flujo en un electroimán.

Conclusión

El contenido de este trabajo permite al usuario desarrollar competencias básicas para el desarrollo de habilidades en el modelado electromagnético usando el software Opera 3d.

Se dan los fundamentos básicos del análisis electromagnético para aplicarse en técnicas de diseño de diversas geometrías de imanes que permitirán modelar núcleos magnéticos con formas geométricas complejas.



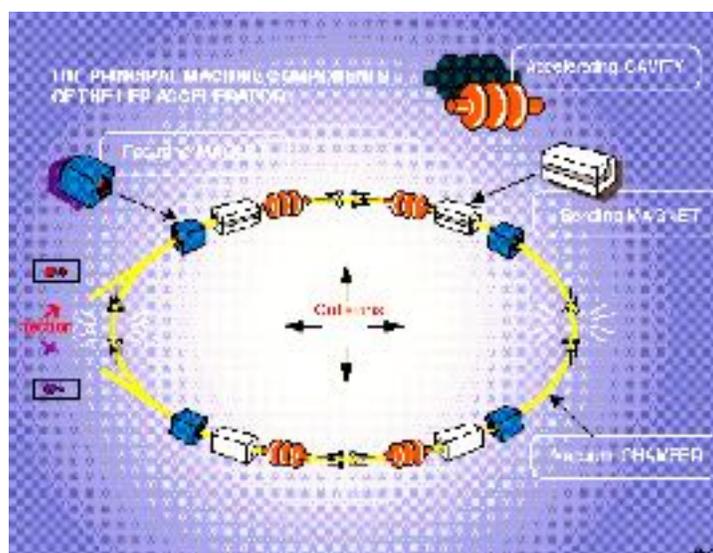
PLAN ESTRATÉGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SINCROTRÓN EN MORELOS.

ANEXO:

**Guía Para el Diseño de Imanes Usando
Poisson-Superfish**

MCF Héctor Domínguez Sotelo

GUIA PARA EL DISEÑO DE IMANES USANDO POISSON-SUPERFISH



MCF HECTOR DOMINGUEZ SOTELO



Guía para diseño de imanes dipolos, cuadrupolos...con Poisson-Superfish

Poisson-Superfish comprenden un conjunto de programas numéricos para simular y resolver dos tipos distintos de problemas: el cálculo de campos magnetostáticos y electrostáticos, y el cómputo de campos y frecuencias de resonancia en cavidades de radio frecuencia (RF), para ello utiliza un sistema cartesiano bidimensional o un sistema de coordenadas cilíndricas tridimensional.

Por estos atributos estos programas son usados en el diseño de imanes y cavidades de radiofrecuencia.

Estos códigos originalmente fueron escritos por Klaus Halbach y Ron Holsinger. Estos programas están agrupados debido a que comparten utilerías y además tienen subrutinas comunes.

La primera etapa en el diseño de un imán o de una cavidad emplea dos tipos de programas comunes para generar la malla de una geometría dada. Para tener una salida gráfica de cualquier problema electrostático se emplea el programa TEKPLOT.

Una vez generada la retícula (también se le llama malla, o red) y se especifican tanto los materiales apropiados como las condiciones a la frontera, se establecen y se resuelven las ecuaciones en diferencias finitas usando uno de los programas indicados para ello.

Para problemas de imanes estos programas son PANDIRA, POISSON y /o MIRT. Para problemas relacionados a cavidades están SUPERFISH y SFO1.

Los programas POISSON y PANDIRA resuelven problemas electrostáticos y magnetostáticos. PANDIRA también resuelve problemas de imanes permanentes. La información referente a estos códigos y los medios para descargarlos se pueden obtener contactando a James H. Billen a esta dirección jbillen@lanl.gov.



Para magnetostática hay cuatro códigos de interés para el diseño de imanes:

- Automesh.EXE

Automesh es el generador de red. Se crea un archivo de texto que define la geometría del problema y el tamaño de la retícula, contiene además un conjunto de variables usadas por el usuario que *automesh* puede entender. Cada conjunto de variables en este archivo comienza con ®, &PO y &MT correspondientes a Region, Point y Material Table.

De este archivo *automesh* toma la información de entrada para generar una red de puntos que escribe en varias matrices que posteriormente son usadas por POISSON o PANDIRA para resolver la distribución de campos magnéticos en una sección transversal bidimensional del imán.

- Poisson.EXE

POISSON usa la salida de automesh y calcula la distribución del potencial vectorial en la geometría bidimensional por aproximaciones sucesivas usando el método de relajación.

Este método es de gran importancia en la solución de sistemas lineales que modelan ecuaciones diferenciales parciales elípticas como la ecuación de Laplace y de Poisson.

Los valores de las funciones solución se especifican en la frontera del dominio. Calcula la distribución del campo magnético a partir del potencial vectorial.

-Pandira.EXE

PANDIRA calcula el potencial vectorial diagonalizando la matriz.

- Wfsplot.EXE

WFSPLOT es una rutina de gráficos, se usa para visualizar la geometría de la malla generada por Automesh o las curvas equipotenciales que resultan de correr las soluciones obtenidas con POISSON o PANDIRA

CONDICIONES A LA FRONTERA DE LOS CAMPOS E, H.

Los campos eléctricos y magnéticos tienen ciertos comportamientos en la interface, cuando pasan de una región a otra, entre dos materiales distintos. Su comportamiento está regido por las llamadas condiciones a la frontera.

| Campo Magnético | Simetría del Campo | Potencial Escalar |
|---|------------------------------------|---|
| TANGENCIAL MAGNETICO | $\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$ | $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ |
| NORMAL MAGNETICO | $\mathbf{H} \times \mathbf{n} = 0$ | $\Phi = \text{constante}$ |
| Campos eléctricos o Flujo de corriente | Simetría del Campo | Potencial Escalar |
| TANGENCIAL ELECTRICO | $\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} = 0$ | $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ |
| NORMAL ELECTRICO | $\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0$ | $V = \text{constante}$ |

Donde:

H es el campo de intensidad magnética

n es el vector normal a la superficie

E es el campo eléctrico

φ es el potencial escalar magnético

V es el potencial escalar eléctrico



Definición geométrica.

- 1.- Todas las regiones deben cerrarse tal que las primeras y las últimas sean iguales.
- 2.- Cada línea debe empezar y terminar con & ó \$.

METODOLOGÍA PARA USAR POISSON-SUPERFISH

Se describe a continuación la secuencia de pasos que se debe seguir para el diseño de un imán usando estos programas.

Estructura del flujo para Poisson/Pandira

- 1) Se escribe un archivo de texto que contiene toda la información requerida para definir el problema
 - Si a esta altura se corre *WFSPlot*, el archivo *Tape 35*, el cual es generado por el mismo programa, se usa para visualizar la geometría del problema en cuestión.
- 2) Se guarda el archivo usando la extensión como: *archivo .am*, en el mismo folder donde se haya descargado la paquetería del software Poisson-Superfish.
- 3) Se corre *Automesh* usando este archivo. Automesh sobre escribe el archivo *Tape 35* escrito por el propio Automesh.
- 4) Se corre el archivo generado por Automesh *Tape 35* con Poisson/Pandira .
 - *WFSPlot* se corre usando con archivo *Tape 35* y genera una salida gráfica de los resultados calculados.
- 5) Output es un archivo de texto que es sobre escrito cada vez que se corre Poisson/Pandira.
- 6) Este archivo contiene la información usada en el programa, incluyendo la curva de magnetización B-H, que es llamada por el archivo de texto.



- 7) Se pueden copiar los resultados contenidos en este archivo para mostrar el resultado de los cálculos.

Para ilustrar al usuario y adquirir el conocimiento básico en el desarrollo de competencias en diseño de imanes, se considera pertinente mostrar en este trabajo, qué estrategia debe seguirse para la simulación de campos magnetostáticos usando este software a través de varios ejemplos.

Es importante que el usuario haga referencia al manual de usuario de Poisson/Superfish contenido en la dirección electrónica mencionada arriba para tener a la mano el conjunto de variables que emplean estos programas y cómo hacer los trazos de arco de círculo, hipérbolas, líneas rectas, etc.



Problema que define la geometría de un dipolo.

Este problema es un ejercicio de gran ayuda para aprender a escribir el algoritmo de un problema tipo Poisson o Pandira. Se mencionan qué estrategia seguir en la elaboración de un programa para modelar un imán.

En este ejercicio se definen primero las constricciones del problema.

Se emplea el signo \$ para antes y después de cada sección del algoritmo. Luego se describe el significado de cada instrucción.

| Instrucción | Significado |
|---------------------|---|
| \$reg mat=1, | ¡Región de aire |
| kprob=0, | ¡problema Poisson/Pandira |
| mode=0, | ¡Permeabilidad finita |
| conv=.1, | ¡Default para mm |
| xmin=0, xmax=150., | ¡rango de interpolación en x |
| kmax=50, | ¡número máximo de k nodos |
| ymin=0, ymax=100, | ¡Rango de interpolación en y |
| lmax=50, | ¡número máximo de l nodos |
| icylin=0, | ¡Cordenadas cartesianas, (=1 simetría cilíndrica) |
| xminf=0, xmaxf=25, | ¡límites para x de 0 a 25 mm con 11 puntos sobre los limites |
| ktop=11 | |
| yminf=0.0, ymaxf=10 | ¡límites para y de 0.0 a 10 mm con 5 puntos sobre los limites |
| ltop=5 | |
| ktype=121, | ¡(1=dipolo,2=multipolo intervalo,1= plano limite Neumann) |
| nptc=31 | ¡Número de puntos en el circulo |
| nterm=14, | ¡Número de términos del multipolo |
| rint=20, | ¡Interpolación de radio |
| rnorm=25, | ¡normalización de radio |



angle=90, ¡ángulo máximo
anglz=0 ¡Punto de partida para interpolación
ienergy=1, ¡no se calcula la energía almacenada

¡Condiciones a la frontera

nbsup=0, ¡Flujo paralelo (Dirichlet)
nbslo=1, ¡Flujo perpendicular (Neumann)
nbsrt=0, ¡Flujo paralelo (Dirichlet)
nbslf=0\$, ¡Flujo paralelo (Dirichlet)

La siguiente operación es escribir el algoritmo del programa en un *Block de Nota*.

Problema que define la geometría de un dipolo

\$reg mat=1, kprob=0, mode=0,

conv=.1,

xmin=0,xmax=150.,

kmax=50,

ymin=0, ymax=100,

lmax=50,

icylin=0, xminf=0.,

xmaxf=25,ktop=11,

yminf=0.0,

ymaxf=10,

ltop=5, ktype=121

nptc=31 nterm=14,

rint=20,

rnorm=25, angle=90,

anglz=0,

ienergy=1,



nbsup=0, nbslo=1, nbsrt=0, nbslf=0\$

La primera región se considera inmersa en aire, la cual describe el conjunto del núcleo del dipolo

! Primera Región aire (mat=1), define los límites

\$po x=0, y=0\$

\$po x=150, y=0\$

\$po x=150, y=100\$

\$po x=0, y=100\$

\$po x=0, y=0\$

! Bobina

\$reg mat=1 cur=-20000\$

\$po x=55, y=25 \$

\$po x=75, y=25 \$

\$po x=75, y=45 \$

\$po x=55, y=45 \$

\$po x=55, y=25\$

! Yugo de hierro

\$reg mat=2\$

\$po x=0, y=25 \$

\$po x=40, y=25\$

\$po x=50, y=50\$

\$po x=80, y=50\$

\$po x=80, y=0 \$

\$po x=120, y=0 \$

\$po x=120, y=80\$

\$po x=0, y=80\$

\$po x=0, y=25



Ejemplo 2 Dipolo tipo C (caso real) tipo dipolo Alba

Dipole Magnet problem

® kprob=0,

¡Problema tipo Poisson o Pandira

Mode =0,

¡Permeabilidad variable

xreg1=14.6, kreg1=71,

¡Coordenadas físicas de regiones para línea de X

xreg2=16.4, kreg2=92,

xreg3=18.5, kreg3=96,

xreg4=36.6, kreg4=109,

xreg5=38.8, kreg5=113,

xreg6=41.0, kreg6=132,

xreg7=43.4, kreg7=136,

kmax=144,

yreg1=14.0, lreg1=45,

¡Coordenadas físicas de regiones para línea la de Y

yreg2=16.0, lreg2=65,

yreg3=18.0, lreg3=70,

yreg4=21.0, lreg4=74,

lmax=80 &

¡Se define la región del imán

&po x= 0.0000, y= 0.0000 &

&po x=57.1500, y= 0.0000 &

&po x=57.1500, y=32.4000 &

&po x= 0.0000, y=32.4000 &

&po x= 0.0000, y= 0.0000 &

¡Se define la región ocupada por el devanado Corriente

® mat=1, cur=-51000.0 &

&po x=15.6800, y= 7.3500 &

&po x=39.3800, y= 7.3500 &

&po x=39.3800, y=15.0600 &



&po x=15.6800, y=15.0600 &

&po x=15.6800, y= 7.3500 &

® mat=2, mtid=1, mshape=0 &

&po x= 0.0000, y= 5.2400 &

&po x= 2.0232, y= 5.2400 &

&po x= 2.4279, y= 5.2401 &

&po x= 2.8325, y= 5.2403 &

&po x= 3.2371, y= 5.2407 &

&po x= 3.3618, y= 5.2412 &

&po x= 4.0464, y= 5.2410 &

&po x= 4.4511, y= 5.2392 &

&po x= 4.8557, y= 5.2359 &

&po x= 5.2604, y= 5.2309 &

&po x= 5.6650, y= 5.2307 &

&po x= 6.0696, y= 5.2416 &

&po x= 6.4743, y= 5.2636 &

&po x= 6.8789, y= 5.2968 &

&po x= 7.2836, y= 5.3144 &

&po x= 7.6882, y= 5.2899 &

&po x= 8.0929, y= 5.2233 &

&po x= 8.4975, y= 5.1145 &

&po x= 8.9021, y= 5.0129 &

&po x= 9.3068, y= 4.9679 &

&po x= 9.7114, y= 4.9793 &

&po x=10.1161, y= 4.9850 &

&po x=10.5207, y= 5.0350 &

&po x=10.9254, y= 5.1000 &

&po x=11.3300, y= 5.2400 &

&po nt=2, x0=10.5, y0=9.3,x=2.7067,y=-3.1424 &

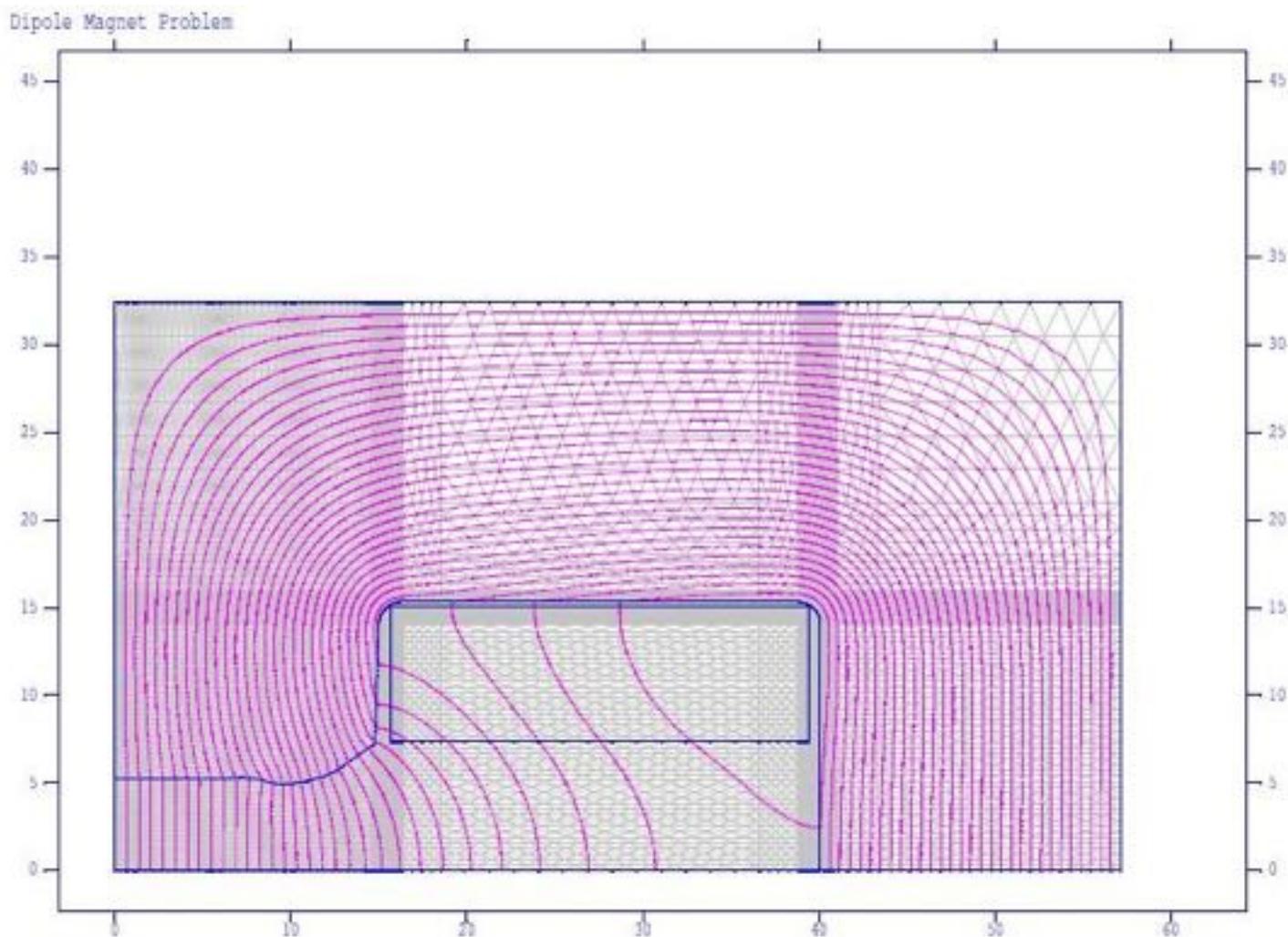


&po x=14.7800, y= 7.2500 &
&po x=14.9900, y=14.0600 &
&po nt=2, x0=16.26, y0=14.06, x=0.0,y=1.27 &
&po x=38.8000, y=15.3300 &
&po nt=2, x0=38.8, y0=14.06, x=1.27,y=0.0 &
&po x=40.0700, y= 0.0000 &
&po x=57.1500, y= 0.0000 &
&po x=57.1500, y=32.4000 &
&po x= 0.0000, y=32.4000 &
&po x= 0.0000, y= 5.2400 &

Fin del algoritmo

El siguiente paso es graficar la región del flujo del problema

Gráfico del flujo de campo en el material del dipolo en forma de C.





Ejemplo 3

Problema de un cuadrupolo simétrico

Debido a su simetría solo se necesita el cálculo de 1/8 de todo del cuadrupolo completo.

El nombre del material que se emplea es para la permeabilidad

Problema tipo Poisson

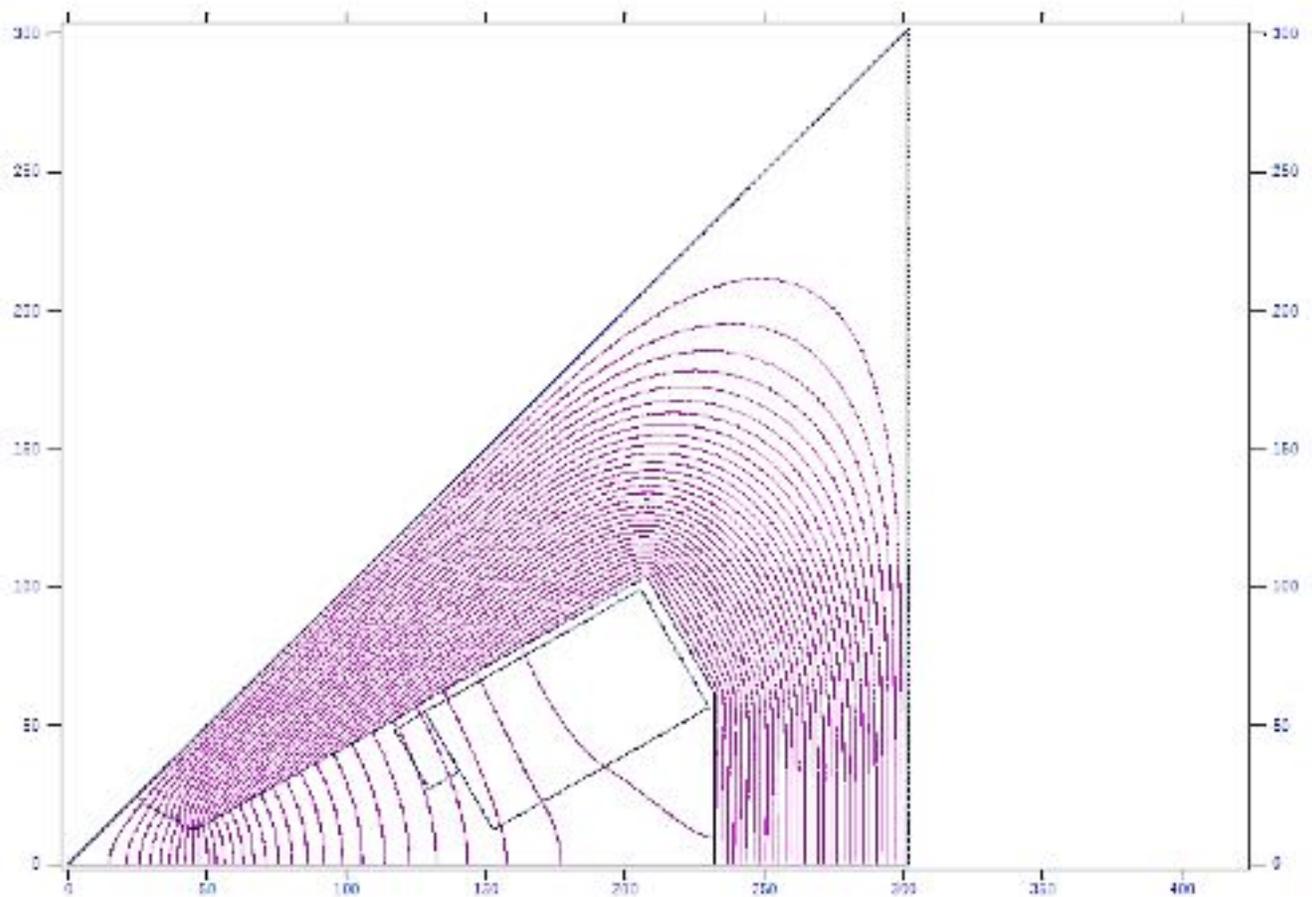
- \$reg mat=1, kprob=0, mode=0,conv=.1
- xmin=0, xreg1=50.0, xreg2=235, xmax=301.65,
- kreg1=60, kreg2=200, kmax=220,
- ymin=0.0, yreg1=30.0, yreg2=108, ymax=301.65,
- lreg1=40, lreg2=120, lmax=220,
- icylin=0,
- xminf=0, xmaxf=230,
- yminf=0, ymaxf=0,
- ktype=4,
- nbsup=0, nbslo=1, nbsrt=0, nbslf=1,
- ktype=241,nptc=46 nterm=14,rint=30, rnorm=32.5, angle=45, anglz=0\$
- !Primer region es aire (mat=1)
- \$po x=0.0, y=0.0\$
- \$po x=301.65, y=0.0\$
- \$po x=301.65, y=301.65\$
- \$po x=0.0, y=0.0\$
- \$reg mat=1 cur=10700\$
- \$po x=128.175, y=55.152\$
- \$po x=205.74, y=99.264\$



- \$po x=230.190, y=56.655\$
- \$po x=152.625, y=12.543\$
- \$po x=140.4, y=33.848\$
- \$po x=128.175, y=55.152\$
- \$reg mat=1 cur=135\$
- \$po x=117.380, y=48.379\$
- \$po x=128.175, y=55.152\$
- \$po x=140.4, y=33.848\$
- \$po x=129.605, y=27.075\$
- \$po x=117.380, y=48.379\$
- \$po x=24.75, y=24.75\$
- \$po x=25.124, y=24.382\$
- \$po x=26.482, y=23.129\$
- \$po x=29.063, y=21.075\$
- \$po x=31.731, y=19.296\$
- \$po x=34.429, y=17.798\$
- \$po x=37.159, y=16.679\$
- \$po x=38.959, y=16.097\$
- \$po x=39.768, y=15.647\$
- \$po x=40.494, y=15.006\$
- \$po x=41.171, y=14.227\$
- \$po x=41.905, y=13.615\$
- \$po x=42.7, y=13.215\$
- \$po x=43.544, y=13.022\$
- \$po x=45.902, y=13.0\$
- \$po x=46.436, y=13.093\$
- \$po x=46.683, y=13.206\$
- \$po x=119.38, y=53.379\$
- \$po x=130.175, y=60.152\$
- \$po x=207.740, y=104.264\$
- \$po x=232.19, y=61.655\$
- \$po x=232.19, y=0.0\$
- \$po x=301.65, y=0.0\$

- \$po x=301.65, y=301.65\$
- \$po x=24.75, y=24.75\$
- \$reg ibound=0\$
- \$po x=0., y=0.0\$
- \$po x=24.75, y=24.75\$
- \$po x=301.65, y=301.65\$

El gráfico de este algoritmo se muestra a continuación



Resultado de la simulación de un cuadrupolo simétrico usando Automesh y Poisson



CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la estrategia que debe seguir el usuario interesado en diseñar y modelar imanes, usando el software Poisson/Superfish.

En el contenido se mostraron ejemplos, dipolo y cuadrupolo, con una geometría muy similar a la de imanes del sincrotrón español Alba, estos ejemplos sirven de guía al usuario para establecer sus metodologías y estrategias de diseño y modelado de campos magnetostáticos.

Se recomienda tener a la mano en todo momento el manual de usuario de los programas Poisson/Superfish para consulta de posibles errores que aparezcan durante el diseño y para consulta de variables usadas por el programa mismo.