

Resum

El treball que es presenta té com a principals objectius el disseny magnètic i el disseny conceptual d'un ondulator ferromagnètic helicoidal. Un ondulator és un tipus de dispositiu d'inserció que es troba a l'anell d'emmagatzematge d'un sincrotró i que corba la trajectòria dels electrons mitjançant camps magnètics periòdics per a obtenir llum de sincrotró amb unes característiques específiques. Aquest ondulator ha de formar part d'una futura línia de llum del Sincrotró ALBA que rebrà el nom de LOREA, *LOW-energy ultra-high-REsolution Angular photoemission for complex materials*, i que estarà dedicada a experiments en el rang de la llum ultraviolada i els raigs X tous.

Primerament, es realitza la modelització magnètica de l'ondulator mitjançant el programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D i s'estudia la forma del camp magnètic en un període de l'ondulator. A partir d'aquesta informació, es modifica el perfil del pol a conveniència per tal d'homogeneïtzar el camp magnètic i la seva integral. També s'estudien altres aspectes del camp magnètic com la saturació o la relació entre la mida de l'entreferro i el camp.

Tot seguit, es desenvolupa un disseny per a les bobines de l'ondulator encarregades de generar el camp magnètic. Es descriu el conductor que s'empra per al bobinat i, també, com es realitzen les connexions entre conductors. S'especifica l'alimentació elèctrica que requereix una bobina i s'estudien les seves necessitats de refrigeració.

Per últim, s'utilitza el programa de disseny assistit per ordinador NX per a resoldre alguns aspectes del disseny mecànic conceptual de les bobines. Es proposa un procediment de muntatge de les bobines i s'estudia com els conductors de les bobines es poden extreure de l'ondulator. Després, es fa una representació completa de l'ondulator.

Índex

1. Introducció	7
1.1. El sincrotró ALBA.....	7
1.2. Objectius	7
1.3. Abast	8
2. Característiques d'una instal·lació de llum de sincrotró.....	11
2.1. Principis físics.....	11
2.2. Llum de sincrotró.....	13
2.2.1. Característiques de la llum de sincrotró	14
2.3. Paràmetres principals d'una instal·lació de llum de sincrotró	16
2.4. Funcionament d'una instal·lació de llum de sincrotró.....	16
2.5. Dispositius d'inserció	18
2.5.1. Comparació amb els imants corbadors.....	19
2.5.2. Anàlisi del moviment d'un electró	20
2.5.3. Classificació: Onduladors i oscil·ladors.....	22
2.5.4. Mitjans per generar el camp magnètic	24
2.6. Història de les instal·lacions de llum de sincrotró	24
3. Ondulador electromagnètic	26
3.1. Especificacions	26
3.2. Característiques de l'ondulador	27
3.2.1. Geometria.....	28
3.2.2. Material	29
3.2.3. Bobines.....	30
3.2.4. Estructura magnètica	31
4. Estudi magnètic	33
4.1. Metodologia: OPERA-3D.....	33
4.1.1. Preprocessament.....	33
4.1.2. Processament i postprocessament	35
4.2. Simulacions.....	36
4.2.1. Modelització d'un quart de període.....	36
4.2.2. Refinament de la malla d'un quart de període	37
4.2.3. Modelització d'un període.....	40

4.2.4. Ajust dels paràmetres.....	40
4.3. Anàlisi de resultats	42
4.3.1. Camp magnètic d'una unitat.....	42
4.3.2. Camp magnètic d'un període.....	46
4.3.3. Expressió analítica del camp magnètic.....	48
4.3.4. Característiques de la llum de sincrotró emesa.....	49
4.4. Optimització del camp magnètic a l'entreferro.....	52
4.4.1. Homogeneïtat del camp magnètic	52
4.4.2. Homogeneïtat de la integral del camp magnètic.....	53
4.4.3. Ajust del perfil dels pols.....	54
4.5. Estudi de la saturació.....	56
4.6. Correcció de possibles imperfeccions	59
4.6.1. Correcció canviant la mida de l'entreferro	59
4.6.2. Correccions elèctriques.....	60
5. Disseny de les bobines	62
5.1. Paràmetres de disseny d'una bobina	62
5.1.1. El conductor.....	62
5.1.2. Tipus de bobines.....	64
5.1.3. Paràmetres de refrigeració	65
5.1.4. Paràmetres elèctrics	67
5.2. Limitacions i paràmetres lliures	68
5.3. Solució escollida.....	69
6. Disseny mecànic conceptual	72
6.1. Muntatge de les bobines	72
6.1.1. Bobinatge dels <i>pancakes</i>	72
6.1.2. Sortida dels conductors.....	73
6.1.3. Connexions	75
6.2. Representació de l'ondulator	76
7. Planificació temporal i costos	77
8. Impacte mediambiental	79
9. Resum de resultats i conclusions.....	81

10. Agraïments	83
11. Bibliografia.....	85
Annex A. Plànol del jou	87
Annex B. Camp magnètic en un període	89
Annex C. Espectres de la llum de sincrotró.....	91
Annex D. Homogeneïtat del camp magnètic	93
Annex E. Saturació	95
Annex F. Representacions de l'ondulator.....	97

1. Introducció

1.1. El sincrotró ALBA

El Sincrotró ALBA és una infraestructura científica destinada a la producció de llum de sincrotró i està situat a Cerdanyola del Vallès, a prop de Barcelona. Aquesta instal·lació està gestionada pel Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum Sincrotró (CELLS) i des de l'any 2012 es troba en funcionament i dona servei als usuaris.

Al Sincrotró ALBA s'acceleren els electrons fins a 3 GeV. El camp magnètic als imants corbadors és de 1,42 T de manera que l'energia crítica de la llum és de 8,5 keV. El perímetre de l'anell d'emmagatzematge és de 286,8 m de llargada i disposa de 17 seccions rectes per a contenir dispositius d'inserció. Com que el Sincrotró ALBA utilitza dispositius d'inserció per a generar la llum de sincrotró es considera que és una instal·lació de tercera generació.

Actualment el Sincrotró ALBA disposa de 7 línies de llum experimentals en funcionament, tot i que té capacitat per a contenir fins a 33 línies. Cadascuna d'aquestes línies està dissenyada per a un tipus d'experimentació concreta i obté la llum de diferents dispositius. Una línia aprofita la radiació provinent d'un dels imants corbadors de l'anell d'emmagatzematge. La resta de línies usen dispositius d'inserció dels quals 2 són oscil·ladors i 4 són ondulators.

1.2. Objectius

Una de les futures línies de llum del Sincrotró ALBA estarà dedicada a espectroscòpies en el rang de la llum ultraviolada i els raigs X tous. Aquesta línia de llum rebrà el nom de LOREA, *LOW-energy ultra-high-REsolution Angular photoemission for complex materials*. Actualment, aquesta línia de llum es troba en fase de disseny i, per tant, encara no està construïda.

L'objecte d'estudi d'aquest treball és el dispositiu d'inserció d'aquesta línia de llum que serà un ondulator ferromagnètic helicoidal. El treball està dedicat a la modelització magnètica del

dispositiu, al disseny de les bobines i a l'anàlisi d'alguns aspectes del disseny mecànic de l'ondulator.

Concretament, els objectius són:

- Descriure el comportament magnètic de l'ondulator i modelitzar-lo mitjançant el programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D.
- Determinar les característiques principals de l'ondulator (material, dimensions de les bobines...) per tal d'assolir el camp magnètic adequat per a generar la llum de sincrotró adient.
- Optimitzar el perfil dels pols per tal de millorar les característiques magnètiques de l'ondulator en cas que sigui necessari.
- Presentar un disseny de les bobines, calcular els paràmetres elèctrics d'una bobina i estimar les seves necessitats de refrigeració.
- Elaborar una proposta pel procediment de muntatge de les bobines i proporcionar una solució per a la sortida dels conductes elèctrics i de refrigeració.

1.3. Abast

Aquest treball forma part d'un disseny i estudi previ a la fabricació i muntatge de l'ondulator i aporta una part de la informació necessària prèvia a la fabricació.

Les tasques referents a l'ondulator que es duen a terme en aquest treball són:

- Modelització magnètica de l'ondulator mitjançant el programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D.
- Disseny de les bobines de l'ondulator i càlcul de paràmetres elèctrics i de refrigeració.
- Disseny mecànic conceptual dels components relacionats amb la generació del camp magnètic mitjançant el programa de disseny assistit per ordinador (CAD) NX.

Per a realitzar aquestes tasques es disposa prèviament de les especificacions de l'ondulator. Per tant, no es parteix de zero, sinó que es disposa de dades suficients per a iniciar directament la modelització magnètica de l'ondulator i, a continuació, realitzar el disseny de les bobines i el disseny mecànic conceptual.

Altres tasques i aspectes com la instal·lació o el muntatge queden fora de l'abast d'aquest treball. Tampoc s'aprofundeix en aspectes com la trajectòria dels electrons dins del dispositiu, aspectes concrets de les característiques de la llum de sincrotró ni els usos i aplicacions específics que pot tenir la llum generada.

2. Característiques d'una instal·lació de llum de sincrotró

Un sincrotró és l'accelerador d'electrons que s'utilitza per a obtenir llum de sincrotró. La llum de sincrotró és la radiació que emeten les partícules carregades elèctricament quan es mouen a velocitats relativistes i se les sotmet a trajectòries corbades. Gràcies a les seves propietats, la llum de sincrotró permet realitzar experiments i investigacions a nivell microscòpic i atòmic en molts camps de la ciència i de la indústria. Per exemple, s'empra en investigacions en els camps de la física i de la química, en l'àmbit farmacèutic i de la biologia, en la ciència dels materials i, també, per a aplicacions industrials.

2.1. Principis físics

Per a accelerar les partícules carregades, normalment electrons, fins a velocitats properes a la velocitat de la llum s'empren camps elèctrics.

El moviment d'una càrrega elèctrica en un camp elèctric ve donat per l'expressió

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E}, \quad (2.1)$$

on \vec{p} és el moment de la partícula, q és la càrrega de la partícula i \vec{E} és el camp elèctric.

El moment \vec{p} d'una partícula es caracteritza com

$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{v}, \quad (2.2)$$

on m_0 és la massa de la partícula en repòs, \vec{v} és la seva velocitat i γ és el factor relativista que es defineix com

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (2.3)$$

on c és la velocitat de la llum en el buit.

D'aquestes expressions se'n dedueix que una partícula sotmesa a un camp elèctric adquireix una acceleració en la direcció i sentit del camp.

També cal destacar l'expressió de l'energia relativista de les partícules quan són accelerades i es mouen a una certa velocitat:

$$E = \gamma m_0 c^2. \quad (2.4)$$

Per tal de produir la llum de sincrotró és necessari corbar la trajectòria de les partícules aplicant un camp magnètic. Això es realitza en acceleradors circulars. En aquests dispositius, les partícules passen successivament pels mateixos camps elèctrics i van sent accelerades progressivament.

El moviment d'una partícula amb càrrega elèctrica sotmesa a un camp magnètic pur ve donat per l'expressió de la força de Lorentz

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (2.5)$$

on \vec{B} és el camp magnètic.

Una partícula sotmesa a un camp magnètic rep una força perpendicular a les direccions de la velocitat i del camp aplicat. Per tant, la curvatura de la trajectòria d'una partícula es realitza aplicant-li un camp magnètic en el pla transversal a la trajectòria que segueix.

Per tal de mantenir les partícules carregades dins de la trajectòria que han de descriure a l'accelerador circular, cal garantir que durant la curvatura la força de Lorentz s'iguali a la força centrípeta [1]:

$$qvB = \frac{m_0 \gamma v^2}{R}, \quad (2.6)$$

on R és el radi de curvatura.

Amb aquesta equació es dedueix la relació que hi ha entre la velocitat v , el camp magnètic B i el radi de curvatura R durant el procés d'acceleració d'una partícula, és a dir, a velocitat v no constant. Si es vol mantenir el radi R fix cal variar el camp magnètic B . Altrament, mantenint el camp magnètic B constant s'anirà modificant el radi de curvatura R . Cal destacar que el

camp magnètic B i el radi de curvatura R es mantenen constants quan les partícules assoleixen una velocitat v constant.

En un sincrotró, durant l'acceleració de les partícules el radi de curvatura R es manté fix i es varia el camp magnètic B . Existeixen altres tipus d'acceleradors de partícules en els quals el camp magnètic B és constant i el radi R va variant. És el cas dels ciclotrons que s'utilitzen, per exemple, per a la fabricació de radiofàrmacs.

En resum, un accelerador circular combina l'ús de camps elèctrics i magnètics per aconseguir que les partícules es vagin accelerant a mesura que segueixen una trajectòria cíclica i tancada.

2.2. Llum de sincrotró

Quan una partícula carregada és accelerada o desaccelerada emet radiació electromagnètica. Aquest fenomen físic ve descrit per les equacions de Maxwell i la llum de sincrotró forma part d'aquest tipus de radiacions.

Per a velocitats properes a la velocitat de la llum, una partícula carregada emet radiació de manera diferent segons la direcció de l'acceleració que presenta. Quan l'acceleració és longitudinal, la radiació s'anomena radiació de frenada (*bremsstrahlung*). En canvi, per a l'acceleració transversal a la velocitat de la partícula, la radiació es coneix com a llum de sincrotró (*synchrotron radiation*).

Tot i que la quantitat de potència radiada en una desacceleració longitudinal pot ser molt més gran que en una acceleració transversal, en els sincrotrons s'empra la radiació causada per l'acceleració normal que corba la trajectòria de les partícules. El motiu és que, a la pràctica, es poden assolir valors molt més grans d'acceleració normal que no pas d'acceleració longitudinal i, també, perquè les característiques de la radiació obtinguda són més interessants de cara a una possible aplicació [1].

2.2.1. Característiques de la llum de sincrotró

L'espectre de la llum de sincrotró emesa es troba representat a la funció universal de la radiació de sincrotró (Figura 2.1). A l'abscissa, s'hi representa l'energia de la radiació electromagnètica respecte l'energia crítica. A l'ordenada, s'hi representa el flux emès respecte el flux màxim. Cal remarcar que els eixos es troben a escala logarítmica i que es tracta d'un gràfic normalitzat, és a dir, vàlid per a qualsevol casuística.

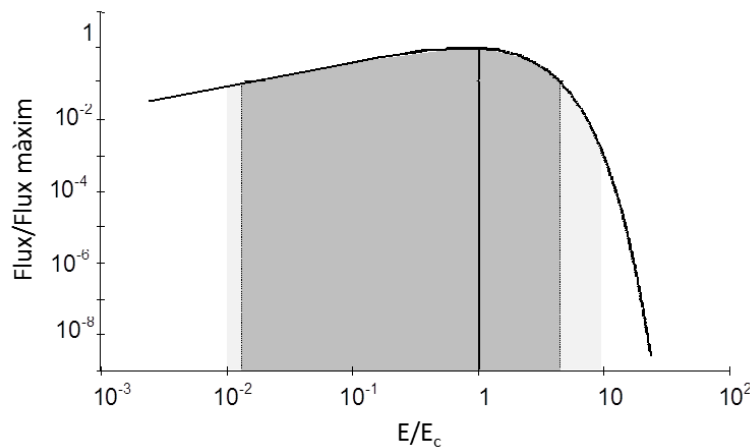


Figura 2.1. Gràfic universal de la radiació de sincrotró

L'energia crítica E_c és la mitjana de la potència lluminosa emesa i divideix l'espectre de la llum de sincrotró en dues parts d'igual flux. La llum presenta un espectre ampli i suau per a radiacions d'energies menors que E_c , mentre que el flux decau ràpidament per a energies superiors a E_c . Per tant, E_c determina la màxima energia aprofitable a la pràctica [1]. Cal destacar que aquesta energia crítica E_c i la corresponent longitud d'ona crítica λ_c són uns dels paràmetres més importants d'un sincrotró. L'energia crítica E_c s'expressa com

$$E_c[\text{keV}] = 0,665 B[\text{T}] E[\text{GeV}]^2. \quad (2.7)$$

La franja gris de la Figura 2.1 mostra el rang d'energies de la radiació emesa que són aprofitables. La llum de sincrotró s'emet en un espectre continu que generalment abasta els infraroigs, la llum visible, els raigs ultraviolats i els raigs X tous i durs. L'energia de la llum emesa depèn de l'energia E de les partícules i del radi de curvatura R . Per tant, com més energia tinguin les partícules i més petit sigui el radi de curvatura, major és l'energia de la llum emesa.

La llum és emesa tangencialment a la trajectòria corbada que descriu el feix de partícules i presenta una gran direccionalitat (Figura 2.2). A més, és altament col·limada amb un angle d'obertura de l'ordre dels mil·liradians [2]. També és d'especial interès la polarització d'aquesta llum ja que pot presentar polarització lineal, circular o el·líptica.

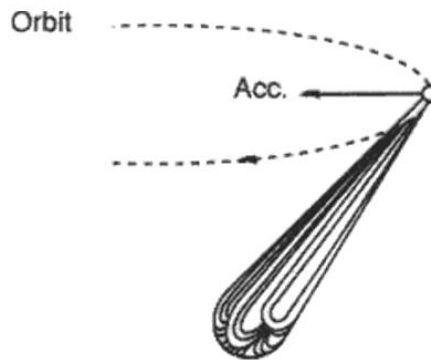


Figura 2.2. Representació del feix de llum de sincrotró emès en una trajectòria corbada

L'emissió de llum de sincrotró és polsada. Les partícules circulen per la instal·lació en forma de paquets discrets de partícules, això fa que l'emissió de radiació no sigui contínua sinó intermitent. El resultat és una llum d'estructura temporal polsada que permet estudiar fenòmens temporals.

La radiació obtinguda en forma de llum de sincrotró és, generalment, més intensa que la que es pot obtenir mitjançant altres tècniques, com per exemple tubs de raigs X tradicionals, sobretot en l'espectre dels raigs X.

Resumidament, les característiques essencials de la llum de sincrotró són [3]: gran col·limació, elevada intensitat, espectre continu des de l'infraroig fins als raigs X, radiació polaritzada i estructura temporal polsada.

2.3. Paràmetres principals d'una instal·lació de llum de sincrotró

Quan es dissenya un sincrotró, el primer que cal decidir és quin rang d'energies de llum es volen. És a dir, amb quin rang de longituds d'ona es vol treballar i realitzar experiments. Aquesta decisió es pren basant-se en les necessitats que expressen els possibles usuaris de la instal·lació [2].

Amb aquesta informació es defineix quina és la longitud d'ona crítica, i també l'energia crítica, que tindrà la llum de sincrotró emesa en la instal·lació. A partir d'aquest valor, es defineixen el valor del camp magnètic que corba la trajectòria de les partícules, així com el radi de curvatura, i l'energia de les partícules que hi circulen.

Per tant, el camp magnètic i l'energia dels electrons són característiques del sincrotró que no poden ser variades un cop estan fixades i la instal·lació es troba construïda i en funcionament.

2.4. Funcionament d'una instal·lació de llum de sincrotró

Acceleració d'electrons

Els electrons que s'utilitzen en una instal·lació de llum de sincrotró s'obtenen mitjançant un canó d'electrons (*electron gun*). A continuació, aquests electrons són dirigits cap a un accelerador lineal (*linac*) on reben una primera acceleració. Tot seguit, són injectats en un accelerador circular (*booster synchrotron*) on els electrons hi circulen donant voltes fins que assolixen una velocitat propera a la velocitat de la llum [4].

Per a accelerar els electrons s'usen les cavitats de radiofreqüència. Les cavitats de radiofreqüència impulsen els electrons mitjançant un camp elèctric ressonant que es troba al seu interior. També, cal remarcar que els electrons circulen en tot moment dins de tubs on se'ls hi ha fet el buit. Per tant, existeix un sistema de buit per a mantenir els electrons en aquestes condicions.

Anell d'emmagatzematge

Un cop assolida l'energia oportuna, els electrons s'introdueixen a l'anell d'emmagatzematge (*storage ring*) on hi circulen durant hores o dies produint llum de sincrotró. La funció principal que es duu a terme a l'anell d'emmagatzematge és la producció i aprofitament de la llum de sincrotró que, posteriorment, és emprada per als experiments i les investigacions. A més, per a acomplir aquesta funció, cal que es garanteixi la conservació del feix d'electrons i que es restauri l'energia que es perd a causa de l'emissió de radiació.

L'anell d'emmagatzematge és un accelerador de forma poligonal compost per trams lineals units entre sí pels imants corbadors dipolars (*bending magnets*). Aquests imants s'empren per a corbar la trajectòria dels feixos d'electrons. A més, la llum de sincrotró que és emesa a causa de la curvatura de la trajectòria pot ser utilitzada per a realitzar experiments.

Al llarg de l'anell d'emmagatzematge s'hi col·loquen els imants quadrupolars i sextupolars que s'encarreguen de mantenir el feix d'electrons en bones condicions. És a dir, focalitzen el feix, l'estabilitzen i n'augmenten la col·limació [5]. La disposició dels imants dipolars, quadrupolars i sextupolars en un esquema determinat que es repeteix periòdicament dins de l'anell d'emmagatzematge fins a completar-lo, s'anomena xarxa òptica de la màquina [1]. A més, a l'anell d'emmagatzematge també hi ha cavitats de radiofreqüència per a restituir l'energia consumida per la radiació emesa.

Finalment, cal destacar els dispositius d'inserció (oscil·ladors i ondulators) que s'introdueixen a les seccions rectes de l'anell únicament amb l'objectiu d'obtenir llum de sincrotró amb unes propietats i característiques específiques.

Línies de llum

Situades tangencialment a l'anell d'emmagatzematge es troben les línies experimentals (*beamlines*) que aprofiten la llum de sincrotró irradiada per a realitzar els experiments oportuns. Cada línia experimental consta de diverses parts. Primerament, hi ha una zona on es realitzen els tractaments òptics convenients a la llum de sincrotró provinent de l'anell d'emmagatzematge. A continuació, es troba la cabina d'experimentació on la mostra és irradiada. Finalment, hi ha la cabina de control on es reben i es processen les dades que s'obtenen de l'experiment amb la mostra.

2.5. Dispositius d'inserció

Un dispositiu d'inserció és un sistema magnètic constituït per una sèrie d'estructures magnètiques alineades de tal manera que el camp magnètic generat és periòdic al llarg de l'eix corresponent a la direcció de la trajectòria dels electrons. Les càrregues elèctriques que travessen el dispositiu d'inserció, obligades a oscil·lar en el pla perpendicular al camp magnètic, emeten llum de sincrotró amb unes característiques especials [6].

La funció principal d'aquests dispositius és generar radiació. Per tant, són generadors de llum de sincrotró. Els dispositius d'inserció (*insertion devices (ID)*) s'insereixen a les seccions rectes dels anells d'emmagatzematge i per aquest motiu reben aquest nom.

Cada dispositiu d'inserció disposa habitualment de dues col·leccions d'imants situades l'una damunt de l'altra amb un espai d'una certa distància que els separa. Aquesta distància de separació s'anomena entreferro (*gap*). Hi ha un pla de simetria entre les dues col·leccions d'imants i els electrons es mouen per aquest pla realitzant un moviment oscil·lant. A la Figura 2.3 es mostra un dispositiu d'inserció amb dues col·leccions d'imants, el pla de simetria representat de color blau i el moviment oscil·lant dels electrons pel pla de simetria. Existeixen altres tipus de dispositius d'inserció que disposen de més col·leccions d'imants produint moviments més complexos dels electrons i llum amb propietats diferents.

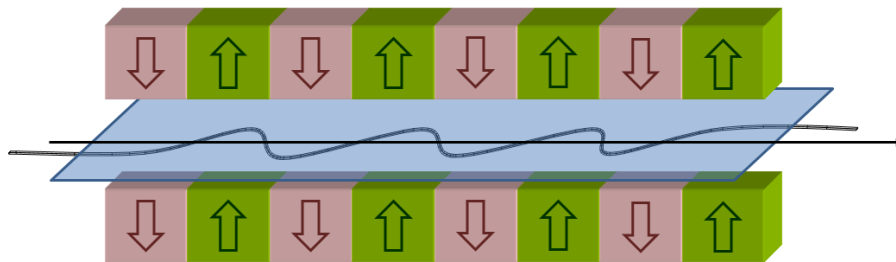


Figura 2.3. Representació d'un dispositiu d'inserció amb dues col·leccions d'imants. En blau, representació del pla de simetria.

Els dispositius d'inserció venen caracteritzats per dos paràmetres principals. D'una banda, el camp magnètic màxim B_0 del conjunt d'imants que, en general, es pot variar segons l'experiment que s'hagi de realitzar. D'altra banda, el període λ_0 que és la longitud del conjunt d'imants repetits més petit que caracteritza el dispositiu. És a dir, l'alineació de diversos períodes conforma el dispositiu creant un esquema repetitiu.

Cal remarcar que la trajectòria global dels electrons dins de l'anell d'emmagatzematge no es veu alterada pel pas a través del dispositiu d'inserció. És a dir, un cop els electrons surten del dispositiu d'inserció continuen amb la mateixa trajectòria que tenien abans d'entrar.

2.5.1. Comparació amb els imants corbadors

Limitacions que presenten els imants corbadors

Un imant corbador dipolar és un sistema magnètic que té com a funció principal corbar la trajectòria de les partícules carregades que circulen a velocitats relativistes per l'anell d'emmagatzematge d'un sincrotró. Com a conseqüència d'aquesta trajectòria corbada les partícules emeten llum de sincrotró. Per tant, la llum de sincrotró emesa en un dipol és el resultat de la realització d'una altra funció i presenta algunes limitacions quan es vol aprofitar per a realitzar experiments. A més, els imants corbadors dipolars no poden ser modificats per a optimitzar o variar les característiques del feix de llum de sincrotró ja que formen part del funcionament de l'anell d'emmagatzematge [7].

Tot i que la llum de sincrotró és molt col·limada en cada instant, aquesta radiació és emesa en un ventall del mateix angle que l'angle que giren els electrons a l'imant corbador. Això prové del fet que en cada moment la llum és emesa tangencialment a la trajectòria que descriuen els electrons. A més, com que la llum que s'aprofita es recull a través d'una petita esclatxa, el resultat és que només una fracció molt petita de la llum emesa per l'imant dipolar pot ser emprada per a realitzar experiments.

Davant d'aquestes limitacions, es presenta la necessitat d'emprar algun altre tipus de dispositiu per a poder obtenir llum de sincrotró amb diferents propietats. Aquests dispositius són els dispositius d'inserció.

Avantatges dels dispositius d'inserció respecte els imants corbadors

Com que un dispositiu d'inserció consisteix en un conjunt d'imants situats consecutivament l'un darrere l'altre, la radiació de cada curvatura se suma a l'anterior. Per tant, augmenta el flux total de llum generada respecte un imant i, també, augmenta el rang útil d'energies de

llum que es poden utilitzar per a experiments. També cal destacar que el ventall d'emissió de la llum és més petit i permet un millor aprofitament de la llum emesa.

A més, com que els imants d'un dispositiu d'inserció no tenen com a objectiu definir la trajectòria dels electrons dins de l'anell d'emmagatzematge, el valor del seu camp magnètic no està condicionat. Per tant, es poden emprar camps magnètics més potents que permeten obtenir llum més energètica.

2.5.2. Anàlisi del moviment d'un electró

S'analitza el moviment d'un electró en un dispositiu d'inserció amb dues col·leccions d'estructures magnètiques l'una damunt de l'altra.

Emprant l'expressió (2.5) de la força de Lorentz i l'expressió (2.2) del moment relativístic i considerant el factor relativista γ constant, es dedueix l'expressió

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m_0\gamma} \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2.8)$$

Si es considera idealment que el camp magnètic del dispositiu d'inserció al llarg de l'eix z i en el pla de simetria ($y = 0$) és sinusoidal i vertical en la direcció y , es pot expressar com:

$$B_y = B_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right), \quad B_x = B_z = 0, \quad (2.9)$$

on λ_0 és la longitud del període del dispositiu d'inserció i B_0 és el valor màxim del camp a l'eix z . La direcció de moviment dels electrons és al llarg de l'eix z i el pla de moviment dels electrons és al pla $y = 0$, és a dir, al pla de simetria.

Si es considera que $|v_z| \gg |v_x|, |v_y|$, el producte vectorial $\vec{v} \times \vec{B}$ té com a resultat únicament el terme $-v_z B_y \vec{i}$.

Finalment, s'obté l'equació simplificada del moviment en forma diferencial:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{q}{m_0\gamma} \left(-\frac{dz}{dt} B_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right) \right). \quad (2.10)$$

Considerant que la velocitat en l'eix z , $v_z \approx c$. Si s'integra l'expressió dos cops, s'arriba a l'expressió de la posició en x de la partícula:

$$x = \frac{qB_0\lambda_0^2}{4\pi^2 m_0\gamma c} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right) = \frac{qB_0\lambda_0}{2\pi m_0 c} \frac{1}{\gamma} \frac{\lambda_0}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right) = \frac{K}{\gamma} \frac{\lambda_0}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right). \quad (2.11)$$

A partir d'aquesta expressió, s'obté el paràmetre de deflexió K que es defineix com

$$K = \frac{qB_0\lambda_0}{2\pi m_0 c} = 93,4 B_0 [\text{T}] \lambda_0 [\text{m}]. \quad (2.12)$$

Efecte del camp magnètic sobre la trajectòria dels electrons

En el cas ideal, el camp magnètic d'un dispositiu d'inserció és periòdic i sinusoidal. Com a resultat, la trajectòria dels electrons dins del dispositiu també ho és. Tanmateix les imperfeccions que pugui presentar el dispositiu d'inserció provoquen que la forma del camp es desviï de la sinusoidal i, en conseqüència, la trajectòria dels electrons també.

La manera d'avaluar i quantificar les desviacions de la trajectòria és mitjançant la primera integral del camp I i la segona integral del camp II [6]:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} B_y(z) dz, \quad (2.13)$$

$$II = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^z B_y(z') dz' dz. \quad (2.14)$$

La primera integral de camp proporciona l'angle de sortida de l'electró respecte l'eix longitudinal. En canvi, la segona integral mostra la posició de l'electró respecte l'eix z a la sortida del dispositiu.

Aquestes integrals haurien de ser zero, però, en cas que el dispositiu d'inserció no sigui ideal deixen de ser-ho. Per tal de satisfer que els electrons segueixen la seva trajectòria i no

pateixen cap mena de desviació durant el pas pel dispositiu d'inserció cal garantir que ambdues integrals siguin zero.

2.5.3. Classificació: Onduladors i oscil·ladors

Els dispositius d'inserció es consideren onduladors (*undulators*) o oscil·ladors (*wigglers*) segons l'espectre d'emissió de la llum de sincrotró que emeten les partícules quan els travessen. Un dispositiu d'inserció es comporta com un ondulador quan es produeixen fenòmens d'interferència a l'espectre d'emissió mentre que es considera un oscil·lador quan no se'n produeixen.

Cal remarcar que un dispositiu d'inserció pot presentar una zona de l'espectre de llum discret amb interferències i l'altra amb un espectre continu. Generalment, a les energies baixes de l'espectre els harmònics estan més separats entre ells, és a dir, els pics d'interferència es diferencien els uns dels altres i el dispositiu es considera un ondulador. En canvi, a energies més altes, els pics dels harmònics es confonen entre ells fins a aparentar un espectre continu i el comportament correspon a un oscil·lador.

Criteri de classificació

Per a reconèixer si un dispositiu d'inserció és un oscil·lador o un ondulador cal saber si els cons de radiació emesos se solapen i interfereixen entre ells o no en funció de la mida del ventall d'emissió de radiació. Es produeixen fenòmens d'interferència quan el ventall d'emissió és semblant o menor que el con de radiació.

El ventall amb el qual s'emet la llum de sincrotró correspon alhora amb l'angle d'oscil·lació dels electrons dins d'un dispositiu d'inserció. Aquest angle té una amplitud $\frac{K}{\gamma}$ radians i es dedueix a partir de l'equació del moviment (2.11). En canvi, la llum de sincrotró s'emet en un con d'un angle d'obertura de $\sim \frac{1}{\gamma}$ per als raigs X durs i en un con més gran per llum d'energies més baixes [7].

Quan $K \leq 1$, es produeixen fenòmens d'interferència al dispositiu d'inserció i es tracta un ondulador. En canvi, quan $K > 1$, no hi ha fenòmens d'interferència i el dispositiu d'inserció és un oscil·lador. Tanmateix, per valors de $K > 1$ encara es produeixen fenòmens d'interferència a energies de llum baixes (ultraviolat i raigs X tous). En aquest cas, un dispositiu es comporta com un ondulador fins a valors de $K < 10$.

Anàlisi de la interferència

Per a l'estudi de la interferència, es considera el moviment de l'electró dins del dispositiu d'inserció. S'observa el pas de l'electró per dos punts de curvatura A i B separats per un període del dispositiu λ_0 . Al punt A l'electró emet radiació i al cap d'un cert temps l'electró es troba en el punt B en el qual també torna a emetre radiació. Amb el temps que l'electró ha anat del punt A cap al punt B, el front d'ona emès des del punt A ha avançat una distància $\frac{\lambda_0}{v_z} c$ i, per tant, es troba més avançat que el front d'ona provinent del punt B.

La distància que separa els fronts d'ona d'A i de B es pot expressar com

$$d = \frac{\lambda_0}{v_z} c - \lambda_0. \quad (2.15)$$

Per tal que la interferència sigui constructiva, cal que $d = n\lambda$, on n és un nombre enter que fa referència a l'harmònic i λ és la longitud d'ona a la qual es produirà la interferència constructiva. És a dir, l'electró s'ha de retardar un nombre enter n de longituds d'ona respecte el front d'ona anterior al llarg d'un període.

Finalment, després de treballar amb les equacions, s'arriba a l'expressió de la longitud d'ona, a partir de la qual s'obté l'expressió de l'energia tant fonamental com dels harmònics [8]:

$$\lambda_n = \frac{1}{n} \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad (2.16)$$

$$E_n[\text{keV}] = n \cdot 9,498 \frac{E[\text{GeV}]^2}{\lambda_0[\text{m}] \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)}. \quad (2.17)$$

2.5.4. Mitjans per generar el camp magnètic

Es pot aconseguir el camp magnètic dels dispositius d'inserció de diverses maneres.

D'una banda, s'utilitzen bobines i, en aquest cas, s'anomenen dispositius d'inserció electromagnètics. Generalment, les bobines van enrotllades al voltant d'un bloc de material magnètic tou per a augmentar la intensitat i la homogeneïtat del camp. El camp magnètic B_0 d'un dispositiu d'inserció electromagnètic es pot modificar canviant la intensitat que circula per les bobines. La intensitat que es pot fer circular per les bobines és limitada i, per aquest motiu, també s'utilitzen bobines que funcionen amb materials superconductors a temperatures criogèniques.

D'altra banda, també es poden utilitzar imants permanents. En aquest cas, per a modificar el camp magnètic B_0 es canvia la mida de l'entreferro. Com menor sigui la mida de l'entreferro, major serà el valor del camp magnètic.

2.6. Història de les instal·lacions de llum de sincrotró

Inicialment, la llum de sincrotró es considerava un inconvenient en els acceleradors de partícules circulars que tenien com a objectiu fer col·lidir partícules per a l'estudi de la física nuclear i de partícules. En aquest tipus d'instal·lacions, la generació de llum de sincrotró provocada per la curvatura de la trajectòria de les partícules era inevitable, però suposava una molèstia i una despesa energètica ja que no s'aprofitava ni se'n feia cap ús.

Cap als anys 50 es va pensar en aprofitar aquesta radiació paràsita i es van obtenir bons resultats. Així es va iniciar l'aprofitament de la llum de sincrotró en les instal·lacions dedicades a l'estudi de la física de partícules. Aquestes instal·lacions que permetien la utilització d'aquesta radiació però no tenien com a objectiu principal produir-ne es coneixen com a instal·lacions de primera generació.

Vistes les possibilitats que la llum de sincrotró podia oferir, cap als anys 70 i 80 es van posar en marxa les primeres instal·lacions dedicades únicament a l'experimentació amb llum de sincrotró. Aquest tipus d'instal·lacions reben el nom de sincrotrons de segona generació i produïen la llum de sincrotró per als experiments a partir dels imants corbadors.

Finalment, s'ha arribat a les instal·lacions de tercera generació destinades també només a la producció de llum de sincrotró. La radiació no es genera solament amb els imants corbadors, sinó que també disposen de dispositius d'inserció per a obtenir radiació amb propietats més específiques.

Cada generació d'instal·lacions ha aconseguit millorar la qualitat i la potència de la llum de sincrotró produïda [4].

3. Ondulator electromagnètic

El dispositiu d'inserció de la nova línia de llum que rebrà el nom de LOREA és un ondulator helicoïdal ferromagnètic. En aquest dispositiu d'inserció, el camp magnètic s'indueix mitjançant bobines i els electrons hi descriuen una trajectòria helicoïdal. Permetrà emetre un flux intens de llum de sincrotró en un rang dels 10 eV als 500 eV i la llum serà polaritzada el·lípticament.

3.1. Especificacions

Les especificacions s'han determinat coneixent les necessitats dels futurs potencials usuaris. També es tenen en compte les limitacions de la instal·lació com, per exemple, la capacitat del sistema de refrigeració.

Geometria

- Mides d'una unitat: Plànol d'una unitat (Annex A)
- Posicionament de les unitats: Apartat 3.2.1
- Longitud de l'ondulator: 2,1 m
- Nombre de períodes: 10 períodes
- Diàmetre de l'obertura física: 20 mm

Material del jou

- Acers possibles: VACOFLUX 50, ARMCO Steel i Metal Imphy

Bobines

- Densitat de corrent: $10 \text{ A/mm}^2 \leq J \leq 18 \text{ A/mm}^2$
- Secció màxima d'una bobina: $18,5 \times 145 \text{ mm}^2$

Característiques del camp magnètic

- Camp magnètic al punt mig: $0,62\text{T} \leq B_y(0,0,0) \leq 0,65\text{T}$
- Inhomogeneïtat del camp magnètic:

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right| = \left| \frac{B_y(0,0,0) - B_y(10,0,0)}{B_y(0,0,0)} \right| < 0,001$$

- Inhomogeneïtat de la integral $I(x)$ del camp magnètic:

$$\left| \frac{\Delta I}{I} \right| = \left| \frac{I(10) - I(0)}{I(0)} \right| < 0,01$$

Paràmetres de refrigeració de les bobines

- Augment de temperatura del líquid refrigerant: $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
- Flux de refrigerant: $Q < 30 \text{ l/min}$
- Pèrdua de pressió del refrigerant: $\Delta p < 10 \text{ bar}$

Paràmetres elèctrics de les bobines

- Corrent elèctric pels conductors: $I \leq 300 \text{ A}$

3.2. Característiques de l'ondulador

Primerament, cal definir el sistema de coordenades cartesià emprat al llarg del treball. L'eix y és vertical, mentre que els eixos x i z formen un pla horitzontal. L'eix z correspon a la direcció d'avanç dels electrons.

Per a l'estudi d'una unitat de l'ondulador, són d'especial interès el punt mig i el pla de simetria. El punt mig coincideix amb l'origen del sistema de coordenades ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$). Es troba situat al mig de l'entreferro i es tracta del punt del pla de simetria ($y = 0$) que presenta un valor de camp magnètic major. El pla de simetria és el pla $y = 0$ i divideix l'entreferro en dues parts iguals deixant un pol a cada banda del pla. Es tracta d'un pla d'interès, ja que la majoria d'estudis del camp magnètic es duen a terme en aquest pla.

A la Figura 3.1. s'observa el sistema de coordenades que s'utilitza en una unitat i s'aprecia el punt mig o origen de coordenades.

3.2.1. Geometria

Un període de l'ondulator està format per quatre unitats que corresponen a un quart de període cada una. Una unitat està formada per dues bobines i el jou (*yoke*). Les dues parts del jou que es troben envoltades per les bobines s'anomenen pols. A la Figura 3.1 es poden observar les diferents parts d'una unitat així com el sistema de coordenades cartesià emprat. El jou està representat en verd i en verd més clar es veuen els pols que estan envoltats per les bobines de color vermell. Entre els dos pols, s'hi troba l'entreferro, que és l'espai de pas dels electrons, i, per tant, és la zona en la qual s'estudia el camp magnètic.

Les dimensions d'una unitat del dispositiu estan especificades a l'Annex A.

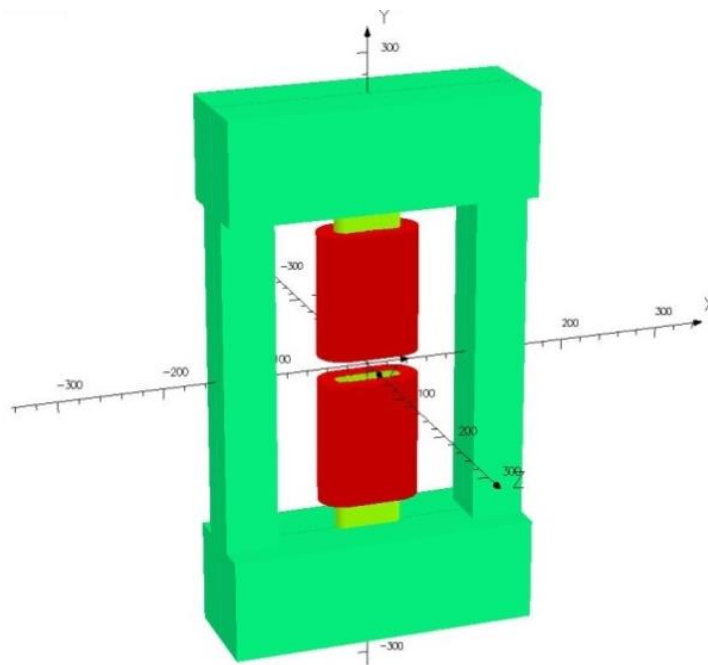


Figura 3.1. Representació d'un quart de període

Les unitats es col·loquen perpendicularment les unes a les altres i la geometria d'una unitat està dissenyada per encaixar de manera robusta amb la unitat precedent i posterior, tal i com es mostra a la Figura 3.2 on hi ha representat un període sencer.

La longitud d'un període és $\lambda_0 = 210$ mm i cada unitat està en contacte amb dues altres unitats, per tant, cada quart de període es troba desplaçat 52,5 mm respecte l'anterior. L'ondulator disposa de 10 períodes, és a dir, 40 unitats, i en total l'ondulator té una llargada de 2,1 m.

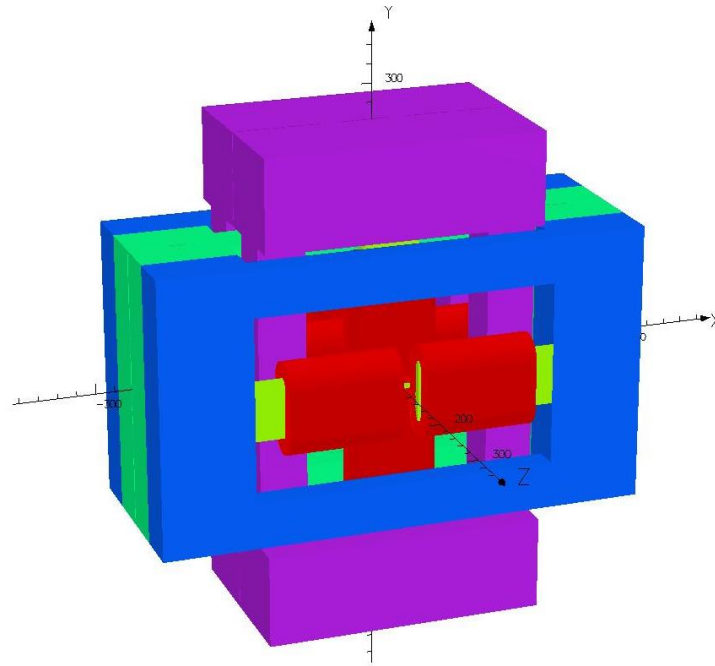


Figura 3.2. Representació d'un període sencer

Quan es munten les unitats del l'ondulador, s'observa l'espai que defineixen els entreferros de les unitats col·locades perpendicularment. L'entreferro d'una unitat mesura 25 mm i, per tant, l'espai lliure és de 25 mm × 25 mm. En aquest espai hi passa el tub de buit a través del qual hi circulen els electrons. Aquest tub té un diàmetre exterior de 22 mm i un diàmetre interior de 20 mm. L'obertura física, és l'espai físic amb el que disposen els electrons per a passar i si en surten es perden, és a dir, deixen de circular per l'anell d'emmagatzematge. L'obertura física queda definida per la secció del tub de buit. Per tant, és una circumferència de diàmetre 20 mm.

3.2.2. Material

Es consideren tres possibles acers amb els quals es podrien fabricar les unitats. Es tracta del VACOFLUX 50, el Metal Imphy i l'ARMCO Steel. Cal remarcar que tot el jou és del mateix material.

Als pols, el camp magnètic generat per les bobines és proper al camp magnètic de saturació. Per tant, a l'hora d'escollir el material, el camp magnètic de saturació és el paràmetre del material que més importància adquireix. Com més alt sigui el camp de saturació, major és el

camp que s'assoleix a l'entreferro. A la Taula 3.1 es presenten els camps de saturació de cada un dels tres materials.

Material	B_{sat} (T)
VACOFLUX 50	2,30
ARMCO Steel	2,07
Metal Imphy	1,91

Taula 3.1. Camp magnètic de saturació de cada material

L'altre paràmetre que cal tenir en compte a l'hora d'escollir el material és el seu preu. Cal remarcar que el preu del VACOFLUX 50 és molt més elevat que el dels altres dos acers. L'ARMCO Steel presenta un preu més baix, mentre que el Metal Imphy és el més assequible dels tres.

El jou es construirà amb acer laminat. S'utilitzaran làmines d'acer d'1 mm de gruix retallades prèviament amb la forma del jou. Les làmines s'apilen formant capes i s'uneixen mitjançant un adhesiu no conductor. Per últim, el jou es mecanitza fins que presenta les dimensions especificades. Els principals avantatges que presenta l'ús de làmines respecte la construcció de l'ondulator a partir d'un bloc massís es llisten a continuació [9].

- Es redueixen els corrents de Foucault en l'acer quan el funcionament de l'ondulator no és constant en el temps.
- S'aconsegueixen propietats magnètiques molt iguals per a tots els jous que conformen l'ondulator.

3.2.3. Bobines

La llum de sincrotró que ha de proporcionar el dispositiu d'inserció no requereix canvis temporals bruscos del camp magnètic. Per als experiments que s'han de realitzar a la futura línia de llum es requereix un camp variable però lent que canviï d'un estat a un altre en un segon. Per aquest motiu, per a l'estudi del camp magnètic de l'ondulator es considera que el corrent elèctric que circula per les bobines és constant i, conseqüentment, el camp magnètic també es constant en el temps.

A les simulacions, el rang de valors que es prenen per a la densitat de corrent elèctric és dels 10 A/mm^2 als 18 A/mm^2 . D'altra banda, al llarg de les simulacions es tenen en compte dues possibles mides per a les bobines. La primera presenta una secció transversal de $17 \text{ mm} \times 121 \text{ mm}$ i la segona té una secció transversal de $18,5 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$. Totes dues seccions són força semblants, però la segona, que és la més gran, aprofita al màxim l'espai disponible per a la bobina.

Cada unitat disposa de dues bobines. El corrent d'ambdues bobines és generat en el mateix sentit, produint una circulació de flux magnètic per tota la unitat. A la Figura 3.3 es veu com el flux magnètic que és generat als pols retorna pel jou. També s'observa com les línies de camp travessen l'entreferro que és la zona d'interès.

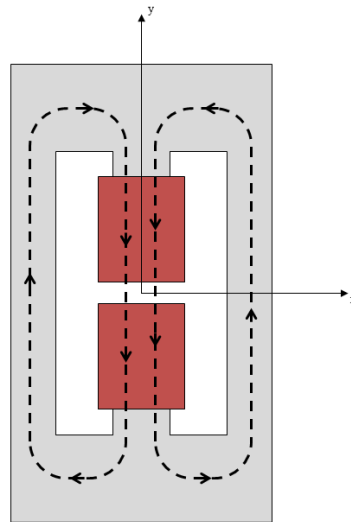


Figura 3.3. Circulació de flux magnètic per la unitat representada en línies discontinúes

3.2.4. Estructura magnètica

La orientació del camp magnètic de les unitats s'estructura tal i com s'indica a la Figura 3.4.

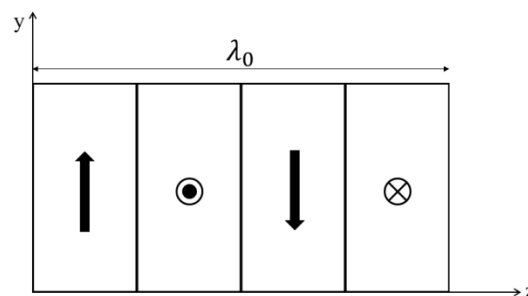


Figura 3.4. Direccions dels camps magnètics de cada unitat en un període

Cada camp magnètic generat és perpendicular a l'anterior. Aquesta disposició crea un camp magnètic resultant que pot ser interpretat com la suma de dos camps periòdics que són perpendiculars entre ells, un en el pla $x = 0$ i un altre en el pla $y = 0$. Els camps magnètics es generen en la direcció dels eixos x i y , mentre que l'eix z correspon a la direcció d'avanç dels electrons. El camp magnètic resultant permet que els electrons descriuïn la trajectòria helicoidal dins el dispositiu d'inserció.

A més, permetent o restringint el pas de corrent per les bobines es pot escollir el tipus de camp magnètic de l'ondulator segons les característiques de la llum que es vulguin. Per tant, poden estar en funcionament totes les bobines o només la meitat d'elles, generant un camp magnètic només vertical o només horitzontal.

4. Estudi magnètic

Per a la modelització magnètica de l'ondulator, s'utilitza el programa OPERA que es basa en el mètode dels elements finits i s'usen models en tres dimensions (OPERA-3D).

4.1. Metodologia: OPERA-3D

L'OPERA (*an OPERating environment for Electromagnetic Research and Analysis*) és un programari per a la modelització, tant estàtica com variable en el temps, de camps electromagnètics i de tota la física relacionada [10]. Aquest programari es basa en l'ús del mètode dels elements finits i permet realitzar models en dues o tres dimensions.

El mètode dels elements finits s'utilitza per a obtenir solucions a equacions que no poden ser solucionades per mètodes analítics. Es tracta d'equacions diferencials o integrals que descriuen una variació temporal o espacial. Generalment, el mètode dels elements finits pot ser aplicat a qualsevol problema que presenti algun tipus de no-linealitat. Es basa en la discretització del domini de l'equació, és a dir, en dividir el domini en dominis més petits anomenats elements i, per a cada element finit, s'utilitza un polinomi per a aproximar-ne la solució.

Primerament, es realitza el preprocessament en el qual es genera la geometria del model a estudiar, defineix la malla i s'assignen les propietats dels materials i les condicions de contorn. A continuació, es duu a terme la simulació mitjançant un programa d'anàlisi. Posteriorment, es realitza el postprocessament, és a dir, observar i analitzar els resultats obtinguts.

4.1.1. Preprocessament

Procediment

Quan es realitza la geometria del model, s'ha de representar el dispositiu a estudiar i les bobines en cas que hi siguin. A més, cal representar l'aire que envolta tot el model ja que el camp no es troba únicament a l'interior del material sinó que també ocupa l'entorn del model.

Un cop feta la representació, s'indica el tipus de material de tots els volums representats i les condicions de contorn a les cares externes del model.

També es poden imposar simetries. L'ús de la simetria permet reduir les dimensions del model mallat i, conseqüentment, reduir el temps de simulació. La simetria s'imposa mitjançant la definició de condicions de contorn en els plans de simetria. Per exemple, es pot imposar la direcció del camp magnètic en el pla. Cal destacar que és necessari representar totes les bobines del model independentment de si s'apliquen simetries o no.

Quan es defineix el mallat de la peça cal garantir que la mida de l'element sigui prou petita per a obtenir resultats precisos, però el més gran possible per a reduir els temps de simulació. Cal remarcar que tant l'aire com els materials es mallen, en canvi les bobines no precisen mallat. La malla d'un model pot ser variable, és a dir, es poden assignar mides de malla diferents a cada regió del model.

L'OPERA permet escollir entre dos tipus de geometries per als elements [10]: els tetraedres i els hexaedres.

- El tetraedres permeten mallar qualsevol forma de geometria, a més, no suposa un problema emprar diferents mides de mallat en un mateix model. La malla tetraèdrica és generada automàticament i, per tant, no permet escollir la orientació dels elements de la malla.
- Els hexaedres permeten obtenir generalment resultats més acurats que no pas els tetraedres. Les malles hexaèdriques són més homogènies i estructurades. A les malles hexaèdriques, els elements poden ser orientats a voluntat. Això permet alinear les arestes dels elements amb les línies equipotencials, aconseguint així resultats més precisos. Tot i els avantatges que ofereixen, els hexaedres presenten limitacions quan es vol mallar geometries molt complicades o combinar diferents mides d'element.

Programes: Modeller i Preprocesor

L'OPERA disposa de dos programes per a realitzar el preprocessament: el *Modeller* i el *Preprocessor*. Ambdós programes permeten realitzar totes les tasques pròpies del

preprocessament, però es diferencien per la forma de definir la geometria i el tipus d'elements que permeten emprar.

Per a la construcció del model, el *Modeller* empra volums primitius i operacions booleanes. En canvi, en el *Preprocessor* es crea el model en dos dimensions en un pla i, posteriorment, és extrudit. La principal diferència que presenten els dos programes és el tipus d'element que permeten emprar. El *Modeller* només permet l'ús d'elements tetraèdrics orientats automàticament. En canvi, al *Preprocessor* es poden utilitzar elements hexaèdrics gràcies a la manera com es defineix la geometria del model.

Al llarg del treball es realitzen les simulacions emprant els dos programes de preprocessament (*Modeller* i *Preprocessor*). Utilitzar els dos programes en paral·lel permet treballar amb malles tetraèdriques i malles hexaèdriques i amb dues definicions de la geometria diferents. D'aquesta manera, es poden verificar resultats i escollir el millor model en cada cas.

Cal remarcar que ambdós programes de preprocessament donen sempre resultats lleugerament diferents per a una mateixa simulació, degut al diferent tipus d'element que s'utilitza en cada cas i a les característiques intrínseques de cada programa. Donat que la malla hexaèdrica, proporciona teòricament resultats més precisos, es considera que els resultats procedents d'un preprocessament amb el *Preprocessor* són més fiables. Per tant, els resultats que es tenen en compte generalment són els proporcionats pel *Preprocessor*.

4.1.2. *Processament i postprocessament*

El programa d'anàlisi que s'empra resol de forma no lineal camps electrostàtics o magnetostàtics. Per tant, realitza un anàlisi en el qual no es produeixen canvis temporals. Cal destacar que, abans d'iniciar qualsevol simulació, s'especifica la tolerància a la qual ha de convergir la solució.

Un cop acabada la simulació es poden observar els resultats. En el cas de l'ondulator estudiat, s'observen i analitzen els valors dels camps magnètic en les tres direccions, o bé, el mòdul del camp magnètic.

4.2. Simulacions

Per a iniciar la modelització, s'utilitzen les següents característiques:

- Material: VACOFLUX 50
- Densitat de corrent: $J = 10 \text{ A/mm}^2$
- Secció transversal de les bobines: $17 \text{ mm} \times 121 \text{ mm}$

4.2.1. Modelització d'un quart de període

La majoria d'estudis i simulacions es duen a terme amb la modelització d'una unitat. Per a la modelització i simulació d'una unitat, s'ha representat únicament un vuitè d'aquesta unitat (Figura 4.1) ja que es considera que hi ha simetria en els tres plans: $x = 0$, $y = 0$ i $z = 0$.

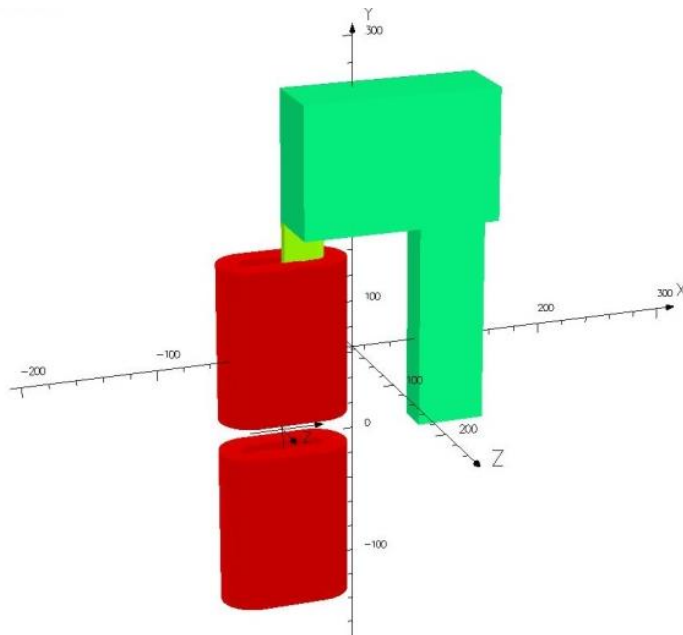


Figura 4.1. Representació d'un vuitè d'una unitat emprat per a la simulació

Coneixent la direcció en què es genera el flux magnètic induït pel corrent de les bobines, es poden definir les condicions de contorn. En el pla de simetria $y = 0$ s'imposa que el camp magnètic és normal mentre que als altres dos plans de simetria, $x = 0$ i $z = 0$, es considera que el camp és tangencial. Pel que fa a l'aire que envolta el material, la majoria de línies de camp segueixen dins del material i, per tant, s'imposa que el camp a les cares externes de

l'aire és tangencial. D'aquesta manera es garanteix, també, que cap línia de camp s'escapa fora del model.

Inicialment, per a la validació dels resultats obtinguts a la simulació, es compara el camp magnètic obtingut amb el que es disposa d'altres simulacions que han estat realitzades amb un altre programari (RADIA). D'aquesta manera es confirma que la modelització amb la qual es treballa no és errònia.

4.2.2. Refinament de la malla d'un quart de període

Conèixer la influència de la malla sobre els resultats permet decidir quin tipus de mallat usar en cada simulació tenint una estimació de l'error que s'està cometent i, alhora, garantir que els resultats són suficientment precisos.

Per a mallar òptimament el model, cal dividir la peça en diverses zones segons la densitat de flux magnètic que rebin i, també, segons el gradient o canvi brusc que pateix el camp magnètic.

- El pol és la zona en la qual el camp magnètic és més pronunciat ja que s'hi genera el camp induït per les bobines i, per tant, requereix un mallat precís.
- L'entreferro és la zona que s'estudia i, a més, el camp tendeix a disminuir-hi el seu valor, fent-se més pronunciat el gradient del camp magnètic. També requereix una mida d'element petita.
- La resta del jou generalment no requereix un mallat fi ja que la secció travessada per les línies de camp és molt gran. S'empeteix més o menys la mida de l'element en funció de la mida de la secció.
- En relació a l'aire, les línies de camp magnètic tendeixen a romandre dins de l'acer i, exceptuant l'entreferro, el mallat de l'aire pot ser gran ja que no afectarà significativament al resultat.

Resumidament, el pol i l'entreferro reben un mallat acurat, mentre que la mida dels elements de les altres zones pot ser més gran pel fet que no influeix tant al resultat a la zona d'estudi.

Al llarg del treball s'han realitzat simulacions amb malles tetraèdriques (programa *Modeller*) i, també, hexaèdriques (programa *Preprocessor*), per aquest motiu es realitza el refinament de la malla per als dos tipus d'elements per separat. A la Figura 4.2 s'observa un exemple de mallat tetraèdric i mallat hexaèdric.

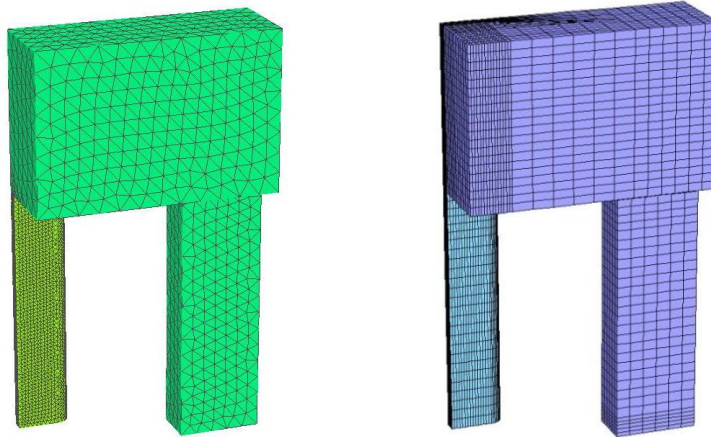


Figura 4.2. Representació d'una malla amb elements tetraèdrics (a l'esquerra) i hexaèdrics (a la dreta).

El procediment a seguir per al refinament és semblant en les dues malles i es basa en observar l'evolució del camp magnètic al punt mig. S'usa una malla suficientment petita per al jou i l'aire, de manera que no influeixi significativament en els resultats de les simulacions. A continuació, es van disminuint les dimensions dels elements de la malla al pol i a l'entreferro progressivament fins que el resultat al punt mig s'estabilitza. Per últim, es comprova que augmentar la mida de la malla del jou i de l'aire no afecti significativament al resultat.

Malla amb tetraedres

A la Figura 4.3, es mostren els resultats del refinament dut a terme. Primerament, en color blau, es refina el mallat del pol mantenint el mallat de l'entreferro constant. A continuació, en color vermell, es refina la mida de l'element de l'entreferro mantenint la mida del mallat del pol constant. Com que la mida de l'element que es necessita als pols i a l'entreferro és força semblant, es decideix realitzar un seguit de simulacions en que la mida del mallat és igual per a tots dos, es mostren en color verd. En aquest darrer grup de simulacions s'observa com el resultat del camp magnètic convergeix en el punt mig a $B_y(0,0,0) = 0,5751 \text{ T}$.

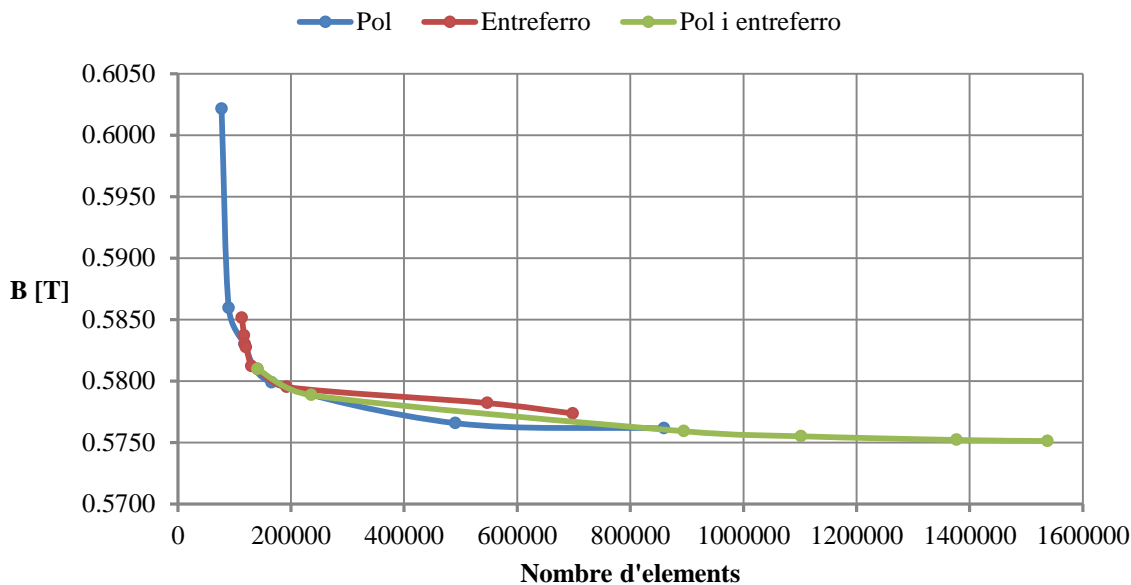


Figura 4.3. Camp magnètic $B_y(0,0,0)$ en funció del nombre d'elements de la malla de les simulacions per a refinar la malla de tetraedres

Malla amb hexaedres

Coneixent el comportament que ha tingut el mallat amb tetraedres, es decideix refinar la malla del pol i de l'entreferro alhora amb elements de la mateixa mida per a tots dos de manera similar com s'ha fet anteriorment. El resultat es mostra a la Figura 4.4 en la qual s'aprecia com el valor del camp al punt mig tendeix a estabilitzar-se fins a un valor $B_y(0,0,0) = 0,5699$ T.

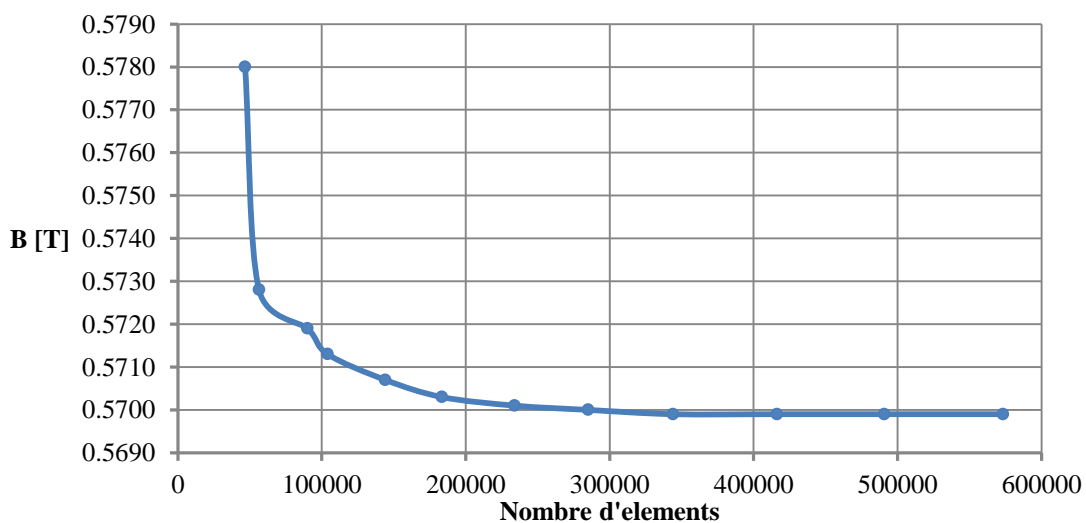


Figura 4.4. Camp magnètic $B_y(0,0,0)$ en funció del nombre d'elements de la malla de les simulacions per a refinar la malla d'hexaedres

Comparant el resultat del camp al punt mig pels dos tipus de mallats a partir dels dos programes de preprocessament diferents, es comprova que els resultats són propers però no iguals, ja que existeix una diferència $B_{y\ tetraedres}(0,0,0) - B_{y\ hexaedres}(0,0,0) = 0,052\ T$ deguda a l'ús de programes i malles diferents.

4.2.3. Modelització d'un període

Encara que generalment es treballa amb la modelització d'una unitat, és necessari comprovar que quan s'uneixen els diversos quarts de període els camps magnètics generats no interfereixen significativament entre ells. Per tal de verificar i comprovar que la decisió de treballar amb un quart de període no comporta error, es modelitza i analitza també un període sencer. La comparació dels resultats de les dues modelitzacions es fa més endavant (Apartat 4.3.1). Ara únicament s'explica com s'ha fet la modelització.

Per a la simulació d'un període complet, s'ha creat la geometria de mig període i s'ha imposat simetria. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir a la meitat el nombre d'elements de la malla i, per tant, el temps de simulació. Tot i això, la mida del model no permet emprar una malla gaire fina, per tant, els resultats obtinguts no són tant precisos com els de la modelització d'una unitat. Les condicions de contorn a totes les cares externes del model són tangencials.

4.2.4. Ajust dels paràmetres

El valor del camp magnètic al punt mig no és prou elevat amb el material, la secció de bobina i la densitat de corrent utilitzats actualment (Apartat 4.2). És $B_y(0,0,0) = 0,57\ T$ i hauria d'arribar a ser de $0,62\ T \leq B_y(0,0,0) \leq 0,65\ T$ per a complir amb les especificacions (Apartat 3.1) i obtenir les característiques de la llum que es necessiten. També interessa comprovar si el camp magnètic especificat es pot assolir amb un acer que tingui un preu més baix que el VACOFLEX 50.

És suficient aconseguir un valor de camp al punt mig que es mantingui dins les especificacions, ja que únicament es vol conèixer el comportament magnètic de l'ondulator. A més, un cop l'ondulator estigui fabricat, poden existir diferències en el material o les

dimensions que modificarien la relació entre la densitat de corrent i el camp al punt mig. Per tant, no cal ara per ara aconseguir un valor de camp magnètic concret.

Es realitzen un seguit de simulacions amb un quart de període per tal d'arribar al valor de camp especificat. D'una banda, s'augmenta la secció transversal de les bobines que passa a ser de 18,5 mm × 145 mm. A més, es decideix anar augmentant progressivament la densitat de corrent: $J = 10 \text{ A/mm}^2$, $J = 12,5 \text{ A/mm}^2$ i $J = 15 \text{ A/mm}^2$. Aquests canvis es simulen per cadascun dels tres possibles materials que es contemplan: VACOFLUX 50, ARMCO Steel i Metal Imphy.

A taula següent, Taula 4.1, es mostren els resultats de les diverses simulacions esmentades.

	VACOFLUX 50	ARMCO Steel	Metal Imphy
$J = 10 \text{ A/mm}^2$	0,5919	0,5434	0,5243
$J = 12,5 \text{ A/mm}^2$	0,6399	0,5907	0,5698
$J = 15 \text{ A/mm}^2$	0,6850	0,6347	0,6124

Taula 4.1. Camp magnètic $B_y(0,0,0)$ (en Tesles) per a diverses densitats de corrent i materials

Veient que l'ARMCO Steel ofereix valors propers als especificats es simula per a una densitat de corrent de $J = 16 \text{ A/mm}^2$, $J = 17 \text{ A/mm}^2$ i $J = 18 \text{ A/mm}^2$. Cal destacar que la densitat de corrent no es pot augmentar gaire més, ja que poden sorgir problemes de refrigeració. Els resultats de les simulacions es mostren a la Taula 4.2.

	ARMCO Steel
$J = 16 \text{ A/mm}^2$	0,6517
$J = 17 \text{ A/mm}^2$	0,6684
$J = 18 \text{ A/mm}^2$	0,6849

Taula 4.2. Camp magnètic $B_y(0,0,0)$ (en Tesles) per l'ARMCO Steel i per a diverses densitats de corrent

S'han marcat en groc els dos valors del camp magnètic simulats amb l'ARMCO Steel al punt mig que es troben dins les especificacions. Es tracta de les simulacions amb una densitat de corrent de $J = 15 \text{ A/mm}^2$ i $J = 16 \text{ A/mm}^2$. Com que es pot assolir el valor del camp magnètic amb l'ARMCO Steel, es descarta el VACOFLUX 50 degut al seu preu molt més elevat.

Per a la resta de l'estudi magnètic (Capítols 4.3, 4.4, 4.5 i 4.6) es considera un material, una densitat de corrent i una secció de bobina diferents als considerats fins ara i que s'adeqüen als resultats obtinguts durant l'ajust de paràmetres. Es treballa amb les següents dades:

- Material: ARMCO Steel
- Densitat de corrent: $J = 15 \text{ A/mm}^2$
- Secció transversal de les bobines: $18,5 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$

4.3. Anàlisi de resultats

S'estudien els resultats del camp magnètic en una unitat i en un període. S'expressa el camp magnètic de forma analítica i es representa l'espectre de la llum de sincrotró.

4.3.1. Camp magnètic d'una unitat

La zona d'estudi del camp magnètic és l'entreferro de la unitat. Tenint en compte l'orientació dels eixos de coordenades de la Figura 3.1, es comprova que el camp magnètic en direcció y , B_y , és significatiu, mentre que en les altres dues direccions és aproximadament zero. Per tant, únicament es tindrà en compte el comportament i valor de B_y .

Per tal de tenir una idea del comportament de B_y a tot l'entreferro es representen tres gràfiques que corresponen al camp magnètic avaluat al llarg dels tres eixos de coordenades.

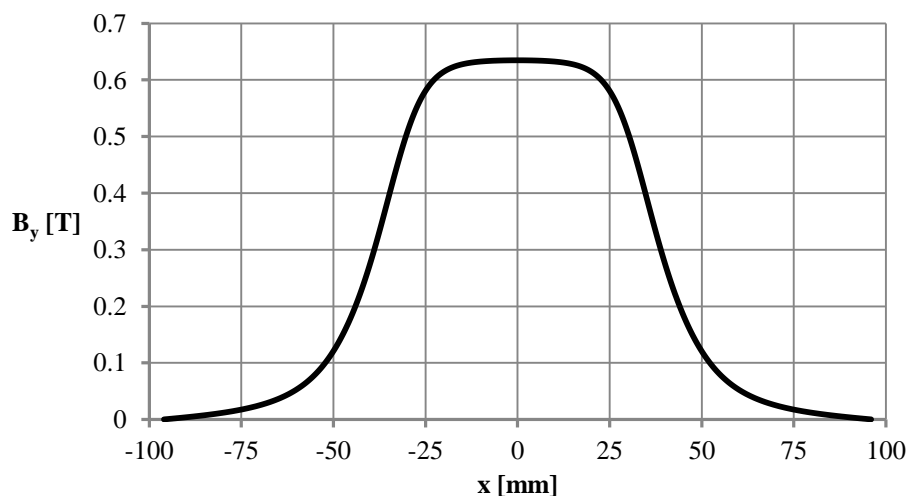
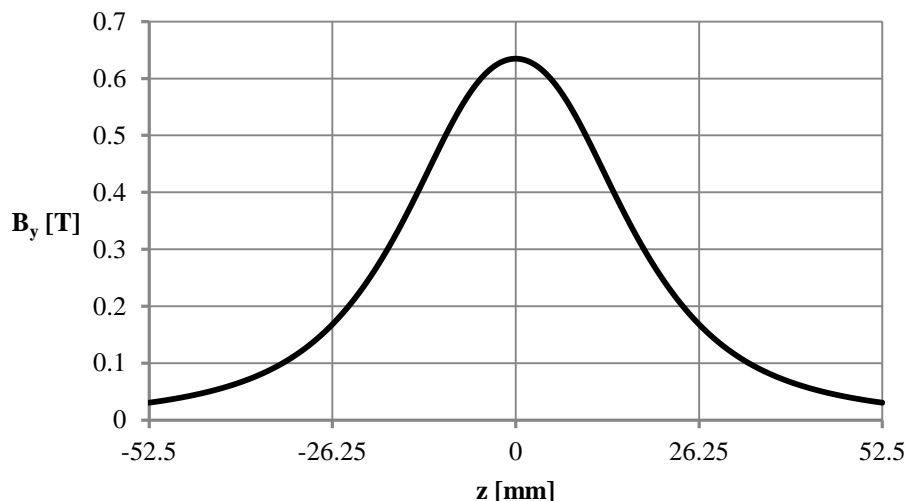
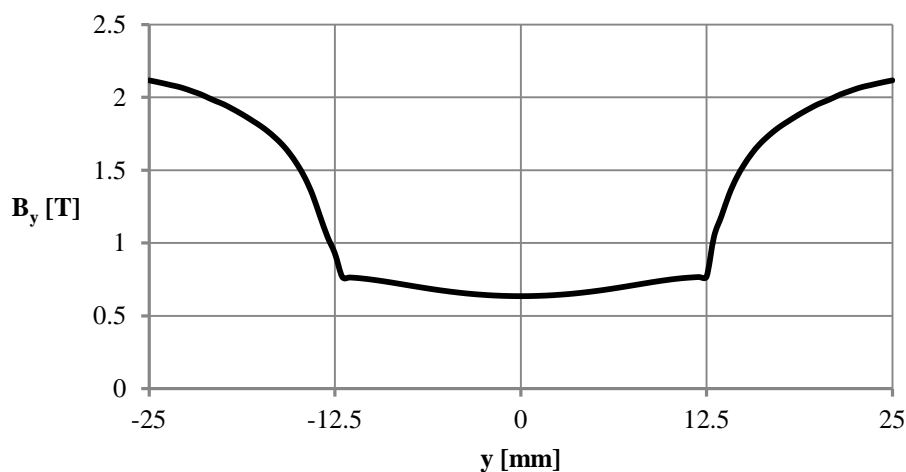


Figura 4.5. Camp magnètic $B_y(x, 0, 0)$ en funció de x a la recta $z = 0, y = 0$

Figura 4.6. Camp magnètic $B_y(0,0,z)$ en funció de z Figura 4.7. Camp magnètic $B_y(0,y,0)$ en funció de y

A les representacions de la Figura 4.5 – Figura 4.7 s'observa que el valor del camp magnètic es manté elevat quan és proper als pols, mentre que decau a les zones més allunyades.

La Figura 4.5 i la Figura 4.6 mostren la variació del camp B_y al llarg dels eixos de coordenades x i z , és a dir, en el pla de simetria ($y = 0$). Es comprova que el punt mig és el punt que presenta un valor més alt en aquest pla i que és $B_y(0,0,0) = 0,6347$ T. Des del punt mig, el valor del camp va decaient progressivament fins a fer-se pràcticament nul. Aquest comportament també s'observa a la Figura 4.8 on es representa el camp magnètic al pla de simetria.

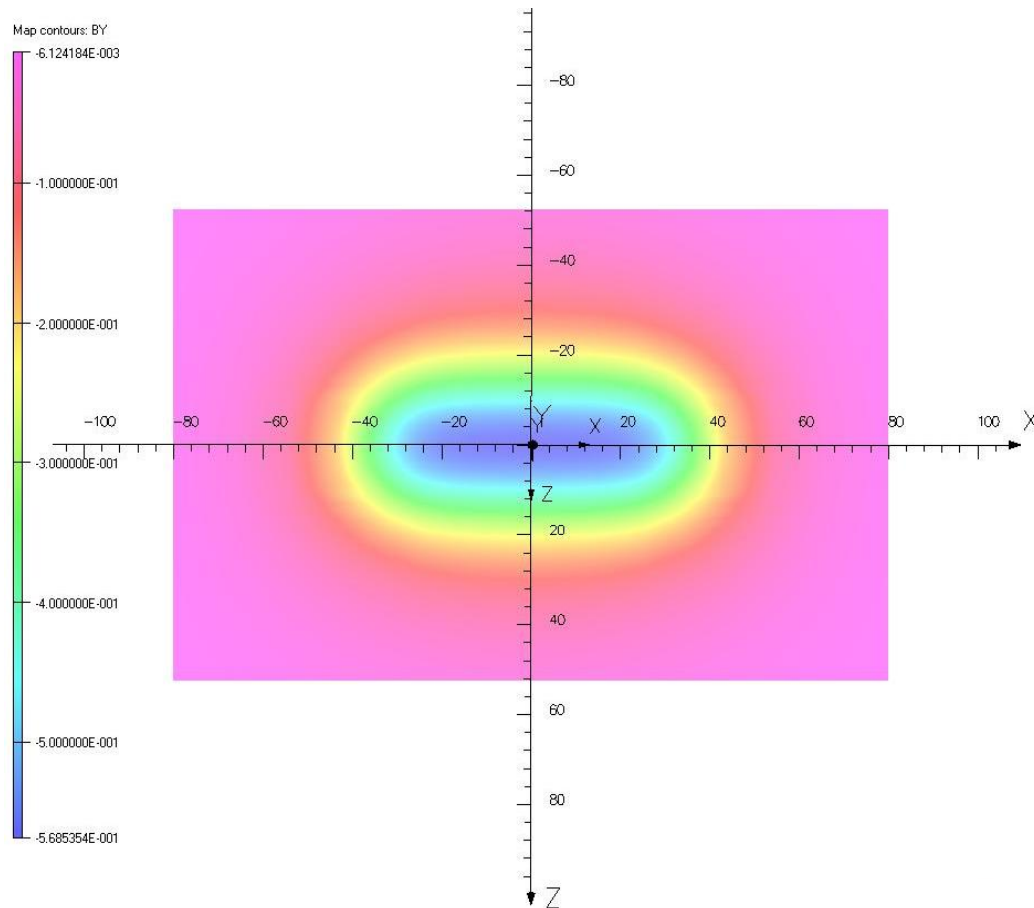


Figura 4.8. Representació del camp magnètic B_y al pla de simetria $y = 0$

La Figura 4.7 mostra l'evolució del camp magnètic verticalment al llarg de l'eix y . A la zona dels pols el camp magnètic és proper al valor del camp magnètic de saturació, el camp va disminuint a mesura que s'apropa al pla de simetria ($y = 0$) i torna a augmentar un cop el supera. El canvi de curvatura que es produeix a $x = \pm 12,5$ mm correspon a la transició del pol a l'entreferro.

El comportament del camp magnètic en la secció transversal $z = 0$ de les unitats es mostra a la Figura 4.9. D'una banda, s'observa el retorn del camp magnètic pel jou. En el retorn, el camp és menys elevat que en la zona dels pols i de l'entreferro. De fet, quasi tota la zona dels pols es troba saturada. D'altra banda, es comprova com el camp magnètic a l'aire és pràcticament nul exceptuant la zona de l'entreferro.

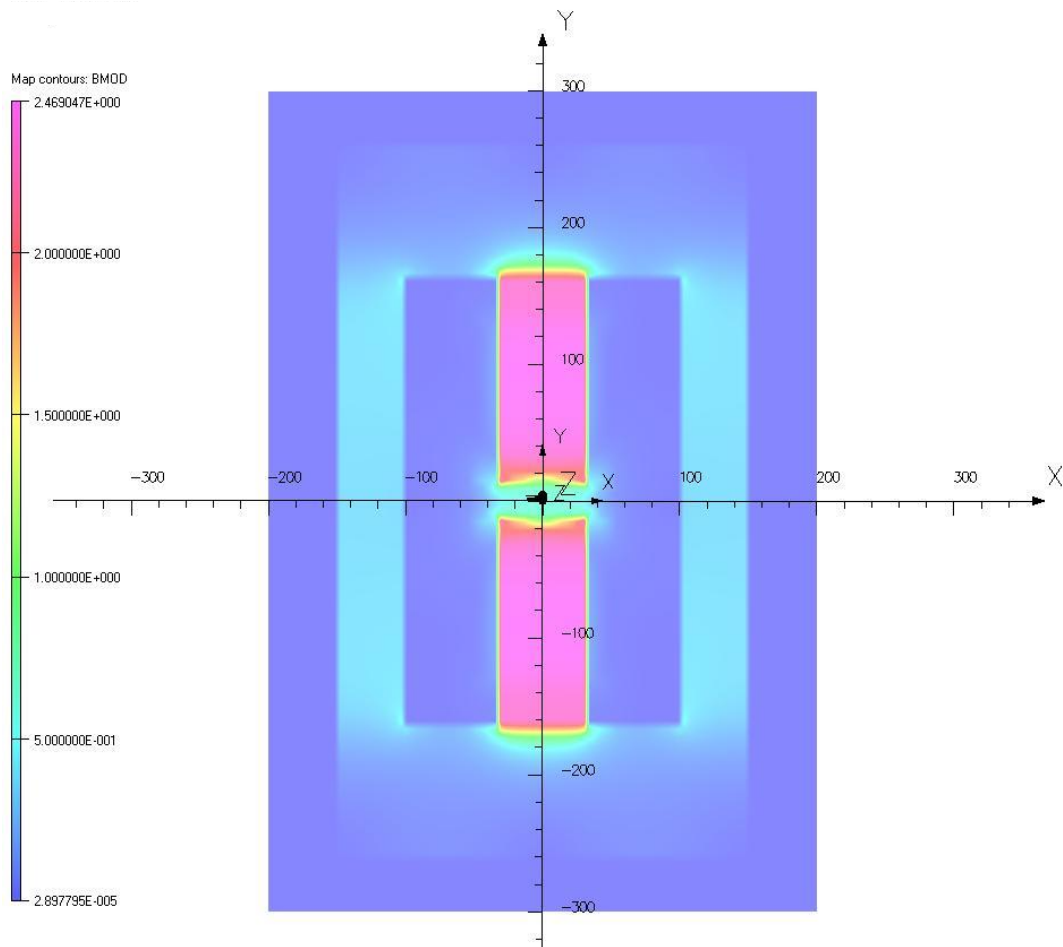


Figura 4.9. Representació del camp magnètic B_y al pla $z = 0$.

Comprovació de la idoneïtat de la simulació d'una unitat

Per tal de determinar si el comportament del camp magnètic generat per un pol es veu afectat pels pols adjacents, es compara el camp magnètic B_y d'una unitat al llarg de l'eix z per a la simulació d'una unitat i d'un període. Es considera que el camp B_y al llarg de z és el que més pot notar la interacció entre les unitats, ja que les unitats de l'ondulador s'encaixen en direcció z .

A la Figura 4.10 s'observa que la forma del camp magnètic generat per un pol quasi no es veu influenciada ni afectada pels pols del volant. Únicament destaca la diferència entre les dues corbes cap als extrems. La corba del camp magnètic simulada a partir de tot el període és zero en els punts $z = \pm 52,5$ mm, que és el que cal esperar d'un camp periòdic. En canvi, quan es simula una unitat sola, el camp no arriba a zero ja que no estan simulades les unitats adjacents que són les que forçarien el camp zero a $z = \pm 52,5$ mm.

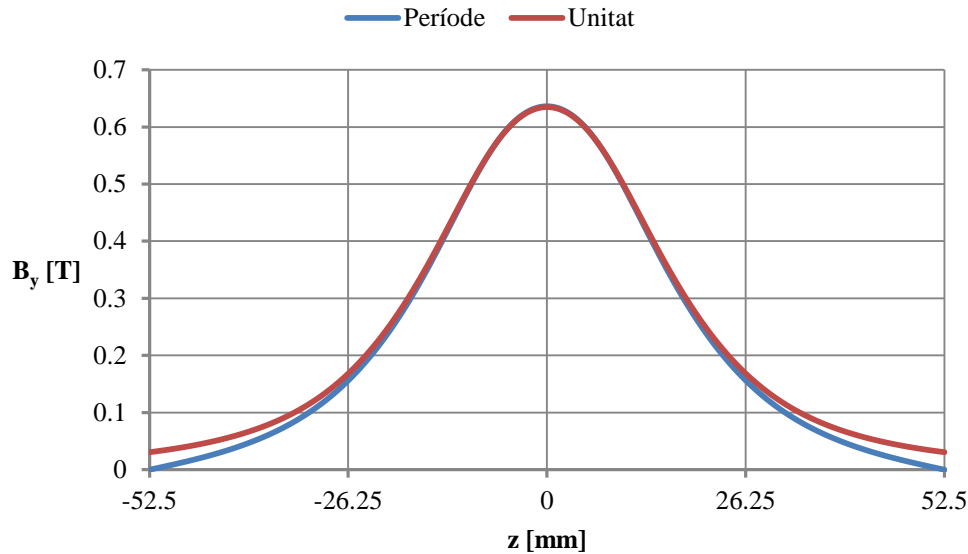


Figura 4.10. Camp magnètic $B_y(0,0,z)$ per a la simulació d'una unitat i d'un període

Es confirma que es poden realitzar les simulacions de la part central de la unitat emprant únicament un quart de període i garantir que els resultats són prou correctes.

4.3.2. Camp magnètic d'un període

A la Figura 4.11 es representa el comportament del camp magnètic en un període al llarg de l'eix z . Com que la disposició dels pols genera camp magnètic en dues direccions, es representen B_x i B_y . Es tracta de camps periòdics però no sinusoidals. Tant el camp magnètic B_x com B_y són exactament iguals, però estan desfasats 90° l'un de l'altre, o el que és el mateix, $52,5$ mm. El camp magnètic resultant $\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y$ va variant la seva direcció al llarg del període, provocant que els electrons descriguin una volta d'hèlix al llarg del període.

A l'Annex B es mostra una representació del camp magnètic B_y d'un període.

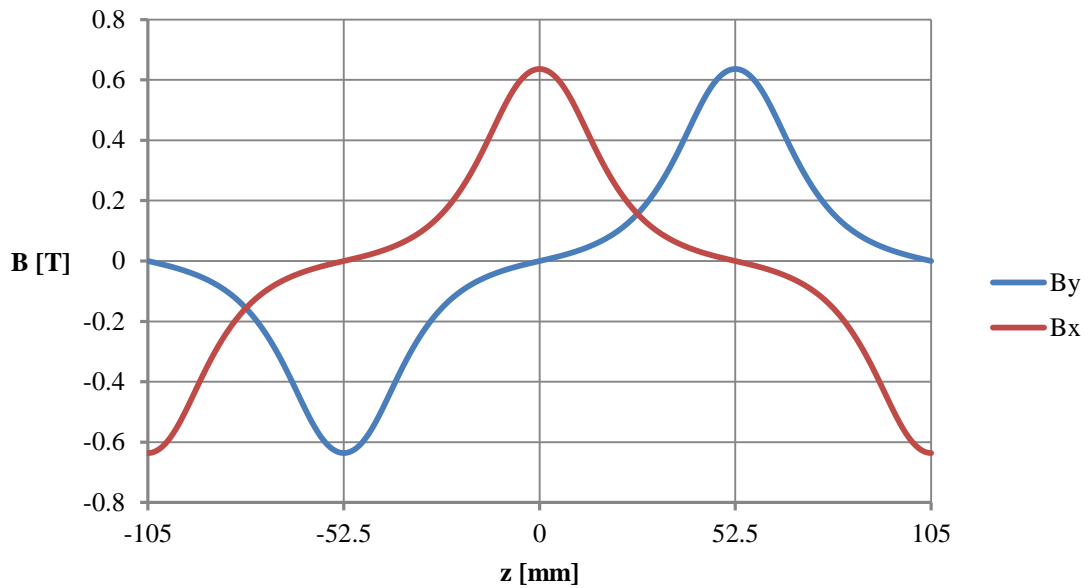


Figura 4.11. Camp magnètic $B_x(0,0,z)$ i $B_y(0,0,z)$ en funció de z a per un període

A la Figura 4.12 s'observa el camp magnètic B_y al llarg de tot l'ondulador, és a dir, tenint en compte tots els períodes. Els dos pols dels extrems generen un camp magnètic més baix expressament mitjançant la regulació de la circulació de corrent de les bobines. L'ús d'aquests pols extrems, amb un camp la meitat de gran que la resta, permet corregir la integral del camp magnètic.

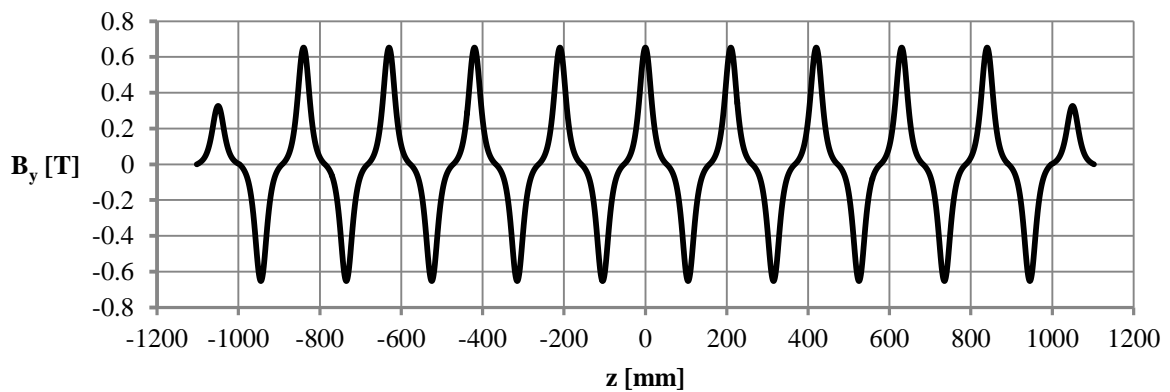


Figura 4.12. Camp magnètic $B_y(0,0,z)$ en funció de z per tot l'ondulador

4.3.3. Expressió analítica del camp magnètic

Els camps magnètics $B_x(0,0,z)$ i $B_y(0,0,z)$ poden ser aproximats mitjançant una sèrie de Fourier, que permet expressar una funció periòdica com una suma de funcions sinus i cosinus:

$$B(z) \approx \frac{a_0}{\lambda_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0} z\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0} z\right) \right]. \quad (4.1)$$

Tenint en compte que es disposa únicament d'una taula de valors de $B_x(z)$ i $B_y(z)$, els coeficients a_0 , a_n i b_n no poden ser deduïts de forma exacta mitjançant càlculs integrals. En comptes d'això, els coeficients s'aproximen mitjançant sumes de Riemann, de forma que els coeficients es calculen de la següent manera [6]:

$$a_0 = \frac{2}{\lambda_0} \sum_{i=1}^m B(z_i) \cdot \delta z, \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{2}{\lambda_0} \sum_{i=1}^m B(z_i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0} z_i\right) \cdot \delta z \quad \forall n, \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{\lambda_0} \sum_{i=1}^m B(z_i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0} z_i\right) \cdot \delta z \quad \forall n, \quad (4.4)$$

on $B(z_i)$ és el valor del camp al punt mig, δz l'amplada del subinterval i m és el nombre total de subintervalls.

Els valors dels coeficients són els següents: $a_0 = 0$, $a_n = 0$ per tot n , $b_n = 0$ per n parell i $b_n \neq 0$ per n senar. A la Taula 4.3 es mostren els valors de b_n .

b_1	0,4175
b_3	-0,1632
b_5	0,04608
b_7	-0,01067
b_9	0,001097
b_{11}	0,0007360

Taula 4.3. Valors de b_n fins a $n = 11$

D'un anàlisi preliminar s'ha comprovat que els tres primers termes b_n són suficients per a reproduir correctament la forma de les corbes $B_x(z)$ i $B_y(z)$ de la Figura 4.11. Per tant, l'aproximació del camp magnètic pot ser expressada com

$$B(z) = b_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z\right) + b_3 \cdot \sin\left(3 \frac{2\pi}{\lambda_0} z\right) + b_5 \cdot \sin\left(5 \frac{2\pi}{\lambda_0} z\right). \quad (4.5)$$

Si es comparen els resultats obtinguts per simulació amb el càlcul analític, l'error calculat per mínims quadrats entre els dos camps $B(z)$ és de només $3 \cdot 10^{-4}$ i es justifica l'aproximació feta.

4.3.4. Característiques de la llum de sincrotró emesa

Un cop conegudes les característiques del camp magnètic generat per l'ondulator es determinen les característiques de la llum que emet aquest dispositiu d'inserció. Es calcula el paràmetre de deflexió K i es representa l'espectre de la llum emesa.

El paràmetre de deflexió

L'expressió del paràmetre de deflexió K ve donada per l'expressió (2.12) quan el camp de l'ondulator correspon una sinusoide. Tanmateix, el camp de l'ondulator estudiat no és una sinusoide, sinó que és una suma funcions trigonomètriques. Per tal de poder determinar el paràmetre K , s'empra el concepte de camp magnètic efectiu B_{ef} definit com

$$B_{ef} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b_n}{n}\right)^2}. \quad (4.6)$$

En el cas considerat, el camp efectiu és

$$B_{ef} = \sqrt{b_1^2 + \left(\frac{b_3}{3}\right)^2 + \left(\frac{b_5}{5}\right)^2} = 0,4221 \text{ T}. \quad (4.7)$$

El camp magnètic efectiu B_{ef} s'utilitza en substitució del camp magnètic B_0 . Coneixent el camp efectiu B_{ef} , es pot determinar el paràmetre de deflexió efectiu K_{ef} :

$$K_{ef} = 93,4 \cdot B_{ef}[\text{T}] \cdot \lambda_0[\text{m}]. \quad (4.8)$$

En el cas del dispositiu d'inserció estudiat, $K_{ef} = 8,26$.

Seguint el criteri presentat a l'Apartat 2.5.3 es comprova de quin dispositiu d'inserció es tracta. El paràmetre de deflexió $K_{ef} < 10$ i el rang de llum que s'aprofitarà per als experiments és llum ultraviolada i raigs X tous, és a dir, energies de llum baixes. Per tant, es verifica que el dispositiu és un ondulator a energies baixes.

L'energia fonamental i els seus harmònics

L'espectre d'emissió de la llum de sincrotró de l'ondulator a energies baixes presenta pics d'interferència. A la Taula 4.4, amb les equacions (2.16) i (2.17), s'han calculat les energies dels harmònics fins a $n = 8$, així com la longitud d'ona (ultraviolat i raigs X tous). L'energia fonamental correspon a l'energia d' $n = 1$ i la resta d'energies que presenten pics corresponen als harmònics d'aquesta energia fonamental i el seu valor n és un múltiple.

	E_n [eV]	λ_n [m]
$n = 1$	11,59	1,07E-07
$n = 2$	23,18	5,35E-08
$n = 3$	34,78	3,57E-08
$n = 4$	46,37	2,68E-08
$n = 5$	57,96	2,14E-08
$n = 6$	69,55	1,78E-08
$n = 7$	81,15	1,53E-08
$n = 8$	92,74	1,34E-08

Taula 4.4. Energia i longitud d'ona dels harmònics de l'espectre de la llum

Aquests valors informen de l'energia dels pics, en canvi, no es té informació sobre el flux de llum que s'emet a aquestes energies. Per a això, cal emprar un programa específic (SPECTRA) que calcula l'espectre de la llum de sortida de l'ondulator coneixent el camp

magnètic al llarg de l'eix z de l'ondulador. A la Figura 4.13 es mostra un exemple de la forma de l'espectre emès a través d'una esclatxa determinada. Es poden observar els pics i el flux de llum emès. També, es comprova que els pics es produeixen a les energies de llum obtingudes per càlculs analítics.

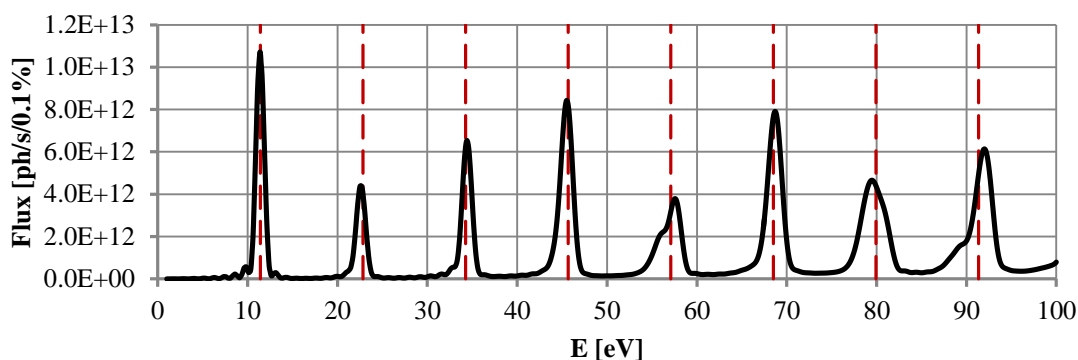


Figura 4.13. Representació de l'espectre de llum emesa a una densitat de corrent $J = 16 \text{ A/mm}^2$ i posició dels pics calculats analíticament en vermell

A l'Annex C es mostra l'espectre de la llum per a diferents esclatxes tant pel cas de la polarització lineal com la polarització circular. En aquestes representacions, s'observa com a baixes energies el comportament del dispositiu correspon a un ondulador. En canvi, a energies altes l'espectre es torna constant i correspon a un oscil·lador.

En molts experiments pot ser d'interès desplaçar els pics dels harmònics, és a dir, canviar l'energia de la llum emesa. De l'expressió de l'energia (2.16), es dedueix que l'energia de la llum es pot canviar modificant el paràmetre K , és a dir, variant el camp magnètic o l'energia dels electrons. Com que l'energia dels electrons és un paràmetre del sincrotró i no pot ser modificat a voluntat, l'única opció és variar el camp magnètic. Si s'augmenta el camp magnètic, augmenta el paràmetre de deflexió K i es disminueix l'energia dels pics, i a l'inrevés.

4.4. Optimització del camp magnètic a l'entreferro

4.4.1. Homogeneïtat del camp magnètic

Es vol aconseguir que el camp magnètic B_y a $z = 0$ avaluat al llarg de l'eix x sigui el més constant possible per un cert rang de valors d' x . S'escull un rang de valors que va des de $x = -10$ mm fins a $x = 10$ mm ja que coincideix amb el diàmetre de l'obertura física. D'aquesta manera, es garanteix que el camp magnètic que perceben els electrons sigui constant en tota l'obertura física i s'assegura que els electrons segueixen dins de la trajectòria de disseny.

La inhomogeneïtat del camp es calcula com

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right| = \left| \frac{B_y(0,0,0) - B_y(10,0,0)}{B_y(0,0,0)} \right|, \quad (4.9)$$

on $B_y(0,0,0)$ correspon al punt mig i $B_y(10,0,0)$ correspon al punt extrem del rang de valors a $x = \pm 10$ mm. Com que hi ha simetria respecte l'eix x , es considera que el valor del camp magnètic als dos extrems del rang és el mateix. La inhomogeneïtat es compara amb un valor màxim acceptable establert a les especificacions (Apartat 3.1) del 0,001:

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right| < 0,001. \quad (4.10)$$

Per tal d'assegurar que els càlculs d'homogeneïtat són acurats, cal que el refinament de la malla garanteixi que el valor del camp és el correcte fins a la tercera xifra significativa. Durant el refinament de la malla (Apartat 4.2.2) s'ha afinat fins a la quarta xifra significativa. A més, també s'ha comprovat que a partir d'una certa mida de malla, la homogeneïtat es manté constant, si bé encara no ha convergit el valor del camp.

La inhomogeneïtat del camp magnètic és $\left| \frac{\Delta B}{B} \right| = 0,00349$ i, per tant, superior al llindar establert. Per a millorar la homogeneïtat del camp magnètic en aquest rang de valors, és necessari modificar la forma de l'extrem dels pols. Aquest ajust es duu a terme a l'Apartat 4.4.3.

4.4.2. Homogeneïtat de la integral del camp magnètic

A continuació, s'avalua la primera integral del camp al llarg de mig període i en el pla de simetria ($y = 0$):

$$I(x) = \int_{-\frac{\lambda_0}{4}}^{\frac{\lambda_0}{4}} B_y(x, 0, z) dz. \quad (4.11)$$

La integral I_x s'avalua en un seguit de valors d' x per tal de poder representar la integral en funció d' x .

Per tal de garantir que tots els electrons que circulen per l'ondulador continuïn dins de la trajectòria de disseny, cal que la integral $I(x)$ sigui el més constant possible en un rang de valors d' x . D'aquesta manera, s'aconsegueix que tots electrons presentin el mateix comportament indiferentment del punt de l'obertura física en la qual es trobin.

Per tal de realitzar els càlculs d'aquesta integral, es prenen els valors del camp magnètic B_y simulat en una taula de punts al pla $y = 0$, des de $x = -20$ mm fins a $x = 20$ mm amb un interval d'1 mm i des de $z = -52,5$ mm fins a $z = 52,5$ mm amb un interval de 0,5 mm. En total es mesura el camp magnètic en 8651 punts.

El càlcul de la integral per una x concreta es realitza mitjançant una suma de Riemann. El valor $B(z_i)$ correspon al camp magnètic al punt mig del interval $[z_{i-1}, z_i]$ i tots els intervals Δz són de la mateixa amplada i mesuren 0,5 mm. Per tant,

$$I(x) = \sum_{i=1}^{211} B(z_i) \Delta z \quad \forall x. \quad (4.12)$$

La representació gràfica de la integral $I(x)$ s'observa a la Figura 4.14.

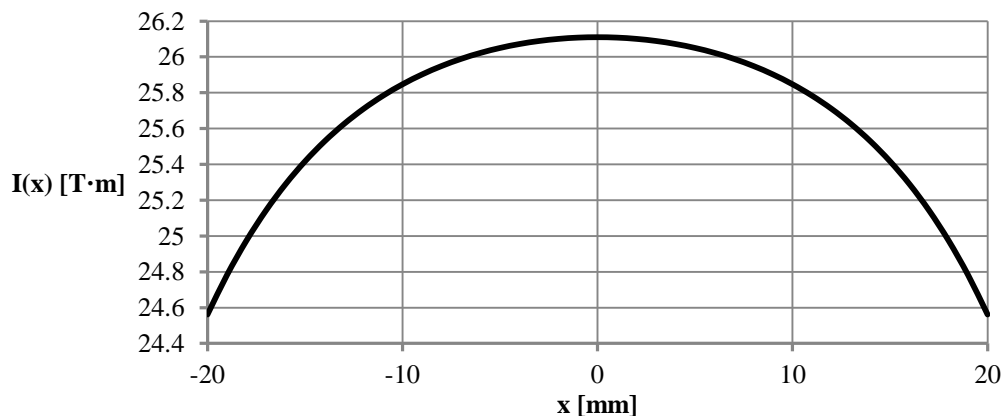


Figura 4.14. Representació de la integral $I(x)$ en funció d' x a $z = 0$ i a $y = 0$

Per al càlcul de la inhomogeneïtat, el rang de valors d' x considerat torna a ser des de $x = -10$ mm fins a $x = 10$ mm. Com que el camp magnètic en la direcció x presenta simetria en $x = 0$, la integral $I(x)$ també presenta aquesta mateixa simetria. Per tant, la inhomogeneïtat s'avalua per $I(0)$ i $I(10)$. Segons les especificacions (Apartat 3.1) s'ha de garantir que la inhomogeneïtat no sigui superior a 0,01:

$$\left| \frac{\Delta I}{I} \right| = \left| \frac{I(10) - I(0)}{I(0)} \right| < 0,01. \quad (4.13)$$

Per al cas modelitzat, la inhomogeneïtat és $\left| \frac{\Delta I}{I} \right| = 0,01$, massa propera al llindar establert. La forma de disminuir la inhomogeneïtat és també modificant el perfil del pol (Apartat 4.4.3).

4.4.3. Ajust del perfil dels pols

Els valors de la homogeneïtat del camp magnètic i de la integral han de ser de l'ordre de 10^{-4} i de 10^{-3} respectivament per tal de complir les especificacions (Apartat 3.1) i amb el perfil de pol inicial no compleixen aquests requisits. En cas que el camp magnètic i la seva integral no siguin suficientment uniformes existeix la possibilitat de modificar el perfil dels pols per tal de millorar-ne les característiques. Aquest procés es coneix com a *shimming* o retoc.

Com que les línies de camp tendeixen a separar-se quan travessen l'entreferro, el camp disminueix el seu valor a mesura que s'apropa a les vores del pol, és a dir, perd la homogeneïtat. Per a contrarestar aquest efecte, es pot modificar el perfil del pol de manera que la mida de l'entreferro disminueixi a les vores. La manera de realitzar aquesta correcció és afegint una mena de falques de forma triangular als extrems.

La mida adequada d'aquestes falques ha estat trobada després de realitzar diverses simulacions amb diverses mides de falques triangulars. Per a cada simulació, s'ha comprovat primerament com és la forma del camp i, en cas que presentés les característiques adequades, s'ha comprovat que el resultat de la integral ha millorat respecte l'original. Cal esperar que si la horitzontal del camp és millorada, consegüentment, aquest resultat es veurà reflectit a la integral. També s'ha comprovat que les falques no entorpeixin el pas del tub de buit per l'entreferro.

S'han realitzat simulacions amb diverses mides per a la base del triangle i, també, amb diverses altures per a cadascuna d'aquestes bases. Generalment, si l'altura del triangle és massa petita, la homogeneïtat no es veu modificada, en canvi, si l'altura és excessiva la forma del camp magnètic deixa de decaure suaument i presenta ondulacions. De la mateixa manera, si la base del triangle és massa petita, la homogeneïtat queda inalterada, mentre que si és massa gran, ràpidament presenta ondulacions.

A l'Annex D es mostren els gràfics d'algunes simulacions que s'han realitzat, així com, a quin perfil de pol corresponen.

De les diverses simulacions realitzades, s'ha escollit la que més s'aproxima al resultat especificat. Llavors s'ha procurat variar lleugerament les mides de les falques fins a aconseguir un resultat que es trobi dins dels llindars especificats. Cal remarcar que la solució proposada no és necessàriament la millor, és una opció que compleix les especificacions.

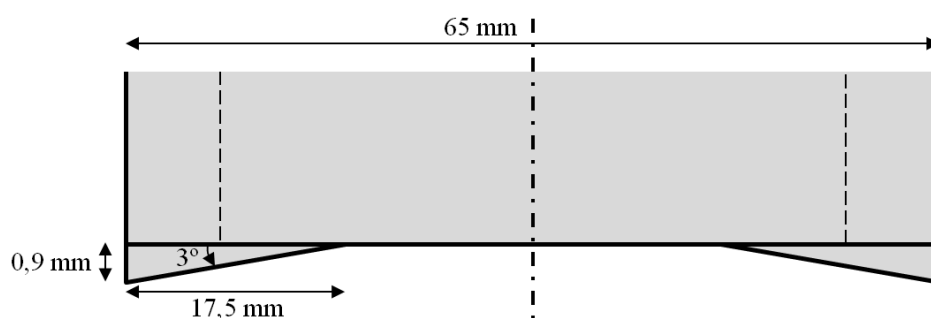


Figura 4.15. Perfil del pol després de realitzar la correcció

A la Figura 4.15 es presenta la solució escollida. Es tracta d'una falca de 17,5 mm de base i 3° d'inclinació que produeix una altura de 0,9 mm. Amb aquesta correcció s'aconsegueix que la inhomogeneïtat del camp magnètic es redueixi fins al $1,75 \cdot 10^{-4}$ i la inhomogeneïtat de la integral sigui de $7,70 \cdot 10^{-3}$. A la Taula 4.5 es mostra una comparació entre el perfil inicial i el modificat i a la Figura 4.16 es fa palesa la millora que s'aconsegueix en la homogeneïtat.

	Perfil inicial	Perfil modificat
Camp	0,00349	0,000175
Integral	0,01	0,00770

Taula 4.5. Comparació de les inhomogeneïtats entre els dos perfils de pol (sense i amb correcció)

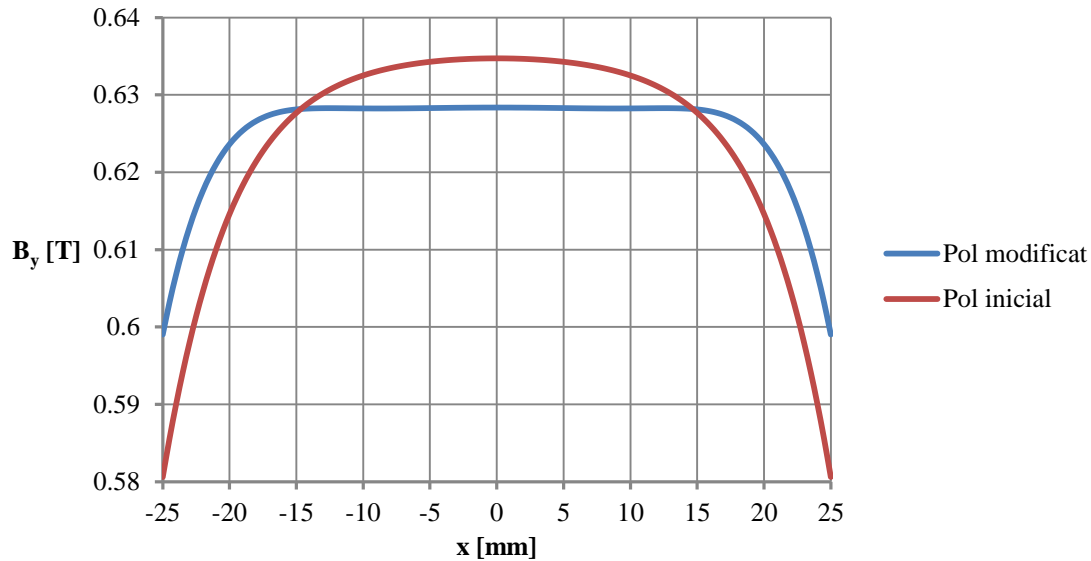


Figura 4.16. Camp magnètic $B_y(x, 0, 0)$ en funció d' x per als dos perfils de pol (inicial i modificat)

Quan es realitza la correcció del perfil del pol, el valor del camp màxim tendeix a disminuir tal i com s'observa a la Figura 4.16. En el cas escollit, el camp magnètic en el punt mig era $B_y(0,0,0) = 0,6347 T$ abans de la correcció, mentre que després de la correcció és de $B_y(0,0,0) = 0,6284 T$. Això representa una disminució de l'1%.

4.5. Estudi de la saturació

La saturació magnètica és un estat dels materials magnètics que s'assoleix quan la magnetització M d'un material no augmenta encara que s'incrementi el camp de magnetització extern H i es produeix sobretot a les arestes anguloses d'un material ferromagnètic.

Una corba BH presenta un comportament força lineal fins que s'apropa al camp de saturació. En aquest punt canvia el pendent de la corba i la corba esdevé pràcticament plana. Conseqüentment, les equacions analítiques per a determinar el camp magnètic són diferents sense i amb saturació. Per tant, quan es realitzen càlculs analítics de les peces magnètiques, cal vigilar que no s'arribi a la saturació a cap zona del material per tal de no obtenir resultats erronis.

Amb el programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D, s'introdueix la corba BH del material a l'hora de definir les dades del problema. El programa inclou l'efecte de la saturació

i, en cas d'assolir-la, el valor del camp magnètic a la zona saturada no augmenta més. Per aquest motiu, usant un programa d'anàlisi d'elements finits, la saturació deixa de ser un aspecte prioritari sempre i quan es puguin obtenir a l'entreferro els valors de camp especificats.

Si s'observa el camp magnètic a una unitat de l'ondulator Figura 4.9, el camp magnètic és saturat en pràcticament tot el pol. Cal destacar que el pol metàl·lic s'empra per a poder canalitzar millor el camp magnètic que genera la bobina, és a dir, evitar la dispersió del camp magnètic. Encara que s'assoleixin valors de camp propers a la saturació, el pol canalitza el camp magnètic millor que si no hi fos. Això es deu al fet que al camp induït per les bobines, cal sumar-hi el camp aportat per la magnetització del material.

A la zona del pol propera a l'entreferro, el camp magnètic comença a decreixer i a allunyar-se dels valors de saturació però les arestes estan saturades. Els extrems del pol en direcció x estan força allunyats de l'obertura física pels electrons. En canvi, les arestes del pol perpendiculars a l'eix z podrien influir al camp magnètic de l'entreferro.

Una aresta que assoleix la saturació, es comporta com si fos aire perquè a la zona saturada l'acer és incapaç d'absorbir més camp. Tradicionalment, la solució passa per realitzar un xamfrà a l'aresta. D'aquesta manera l'àrea afectada per la saturació s'elimina i, com que s'ha suavitzat l'aresta, la saturació desapareix. Cal remarcar que no s'aprecien diferències significatives en el camp magnètic quan s'aixamfrana.

Es realitza un xamfrà a les dues arestes perpendiculars a l'eix z , per tal de constatar que no hi ha diferències significatives a l'entreferro entre una aresta amb saturació i una aresta aixamfranada.

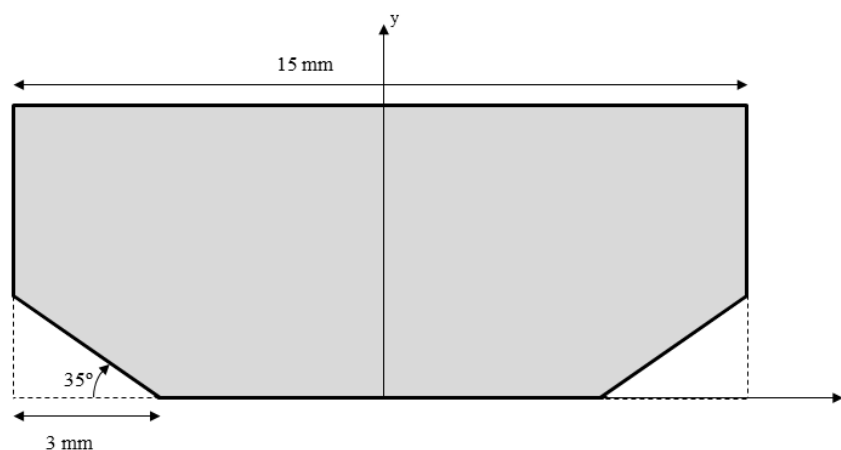


Figura 4.17. Representació dels xamfrans de l'extrem del pol.

El xamfrà s'ha escollit després de diverses simulacions (Annex E) fins a aconseguir eliminar completament la saturació de les arestes. El xamfrà escollit té una base de 3 mm i un angle d'inclinació de 35° tal i com es mostra a la Figura 4.17.

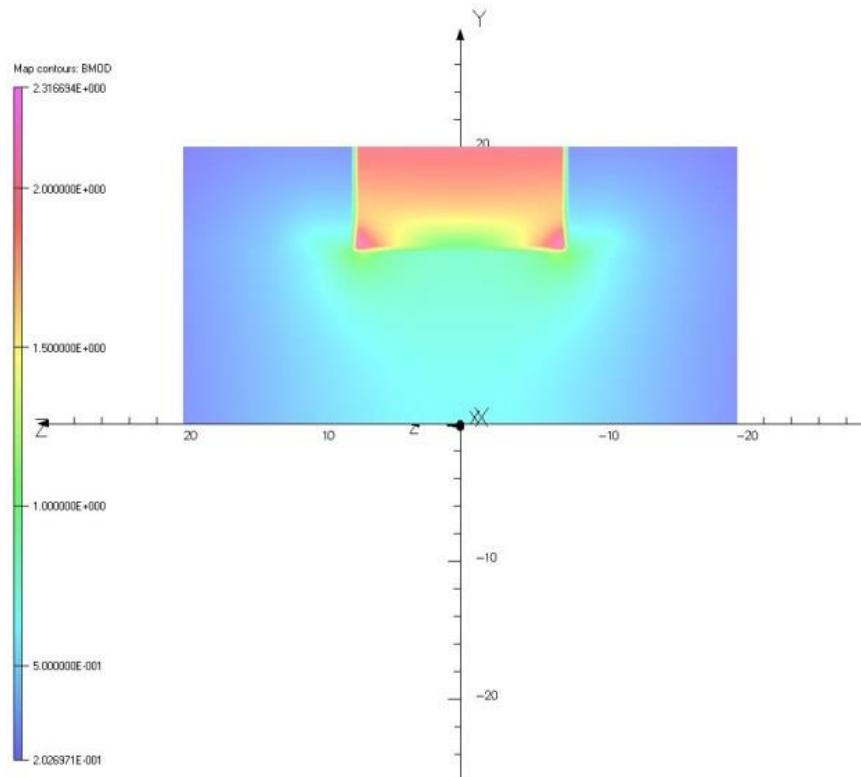


Figura 4.18. Mòdul del camp magnètic al pla $x=0$ abans d'aixamfranar.

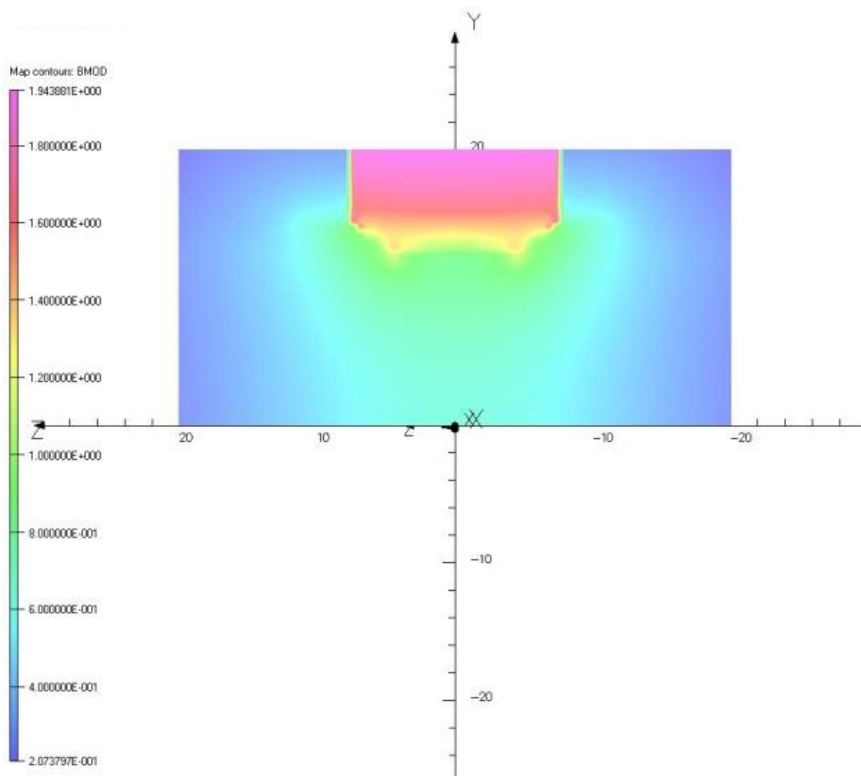


Figura 4.19. Mòdul del camp magnètic al pla $x=0$ després d'aixamfranar.

A la Figura 4.18 es mostra el camp inicialment i a la Figura 4.19 es mostra el camp després d'aixamfranar les arestes. Un cop fets els aixamfranats, la saturació de les arestes desapareix, però no s'aprecia cap més diferència a la representació del camp a les Figures. Pel que fa al valor del camp magnètic al punt mig, esdevé $B_y(0,0,0) = 0,6300$ T, lleugerament més baix que sense els xamfrans. Concretament, representa una disminució del 0,74%.

4.6. Correcció de possibles imperfeccions

Un cop fabricades les unitats que conformen l'ondulador, existeix la possibilitat que el camp magnètic al punt mig no sigui l'estimat inicialment o bé que la integral total del camp magnètic no sigui nul·la. Aquestes imperfeccions poden ser degudes per exemple, al material, les bobines o les dimensions de la unitat. A més, cada unitat pot presentar imperfeccions diverses que afectin de manera diferent al camp magnètic al punt mig. Quan les unitats ja estan fabricades, cal corregir els desajustos ocorreguts durant la fabricació.

S'ha comentat que les dues maneres de modificar el camp magnètic d'un dispositiu d'inserció són modificar la mida de l'entreferro, o bé, variar el corrent elèctric que circula per les bobines (Apartat 2.5.4). Coneixent aquestes dues maneres, es poden corregir els desajustos.

4.6.1. Correcció canviant la mida de l'entreferro

La primera manera de corregir les imperfeccions és ajustant la mida de l'entreferro de cada unitat per tal que el valor del camp magnètic al punt mig sigui l'adequat. Per a això, es fabrica cada unitat en dues parts dividint-la pel pla de simetria ($y = 0$). A la unió entre les dues parts s'hi pot col·locar una placa prima de material plàstic, que permeti augmentar la mida de l'entreferro fins a mig mil·límetre més i, d'aquesta manera, obtenir el valor de camp que calgui. Cal remarcar que la placa de material plàstic és tant prima que no afecta al pas de les línies de camp a través del jou.

Per tal de poder realitzar aquests ajusts més endavant, cal conèixer com varia el camp magnètic al punt mig quan s'augmenta la mida de l'entreferro i a la Figura 4.20 se'n mostra el gràfic resultant.

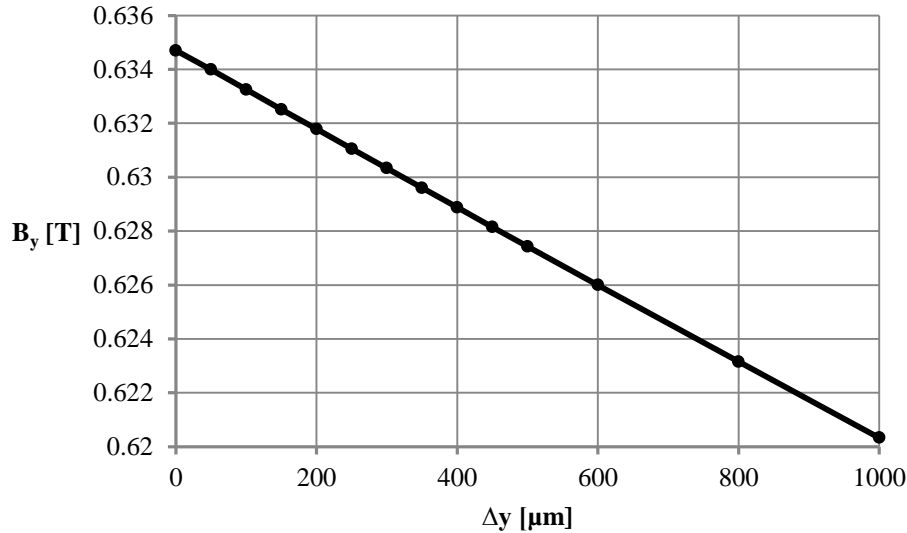


Figura 4.20. Camp magnètic $B_y(0,0,0)$ en funció de l'increment de mida de l'entreferro

S'observa com la variació és lineal, per tant, és senzill deduir quant cal augmentar la mida de l'entreferro per a obtenir el valor de camp magnètic que es vulgui. La recta de regressió que caracteritza el gràfic (Figura 4.20) és $B_y[\text{T}] = -1,440 \cdot 10^{-5} \Delta y[\mu\text{m}] + 0,6347$. Per cada $100 \mu\text{m}$ que s'augmenta la mida de l'entreferro, el camp disminueix $1,44 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

Aquest mètode només permet augmentar la mida de l'entreferro i, per tant, disminuir el camp magnètic. Tanmateix, cal recordar que és possible modificar el corrent elèctric que passa per la bobina a conveniència per tal d'aconseguir els resultats adequats.

4.6.2. Correccions elèctriques

L'altra manera de corregir les imperfeccions és controlant el corrent que circula per les bobines i, també, escollint com es fan les connexions elèctriques entre bobines. La connexió elèctrica entre bobines fa referència a com es connecten les bobines entre elles i determina les fonts de corrent necessàries per a l'ondulador.

Existeixen moltes maneres de realitzar les connexions. Per exemple, es poden proporcionar fonts d'alimentació independents a les bobines de cada unitat per tal de controlar de forma autònoma i separada el corrent que circula per cada unitat, és a dir, el seu camp magnètic. També existeix la possibilitat de connectar en sèrie un conjunt de bobines de manera que sigui possible regular tant el camp magnètic com la integral del camp.

5. Disseny de les bobines

Un cop realitzat el disseny magnètic de l'ondulator és necessari especificar el disseny de la bobina, així com garantir que és possible construir-la. Per a això, cal decidir quin tipus de conductor s'ha d'emprar, com ha de ser el sistema de refrigeració per a evitar sobreescalfaments i quina alimentació elèctrica necessita.

L'ondulator consta en total de 40 unitats i cada unitat disposa de dues bobines. En total hi ha 80 bobines. Com que totes les bobines són iguals, es realitza el disseny considerant una única bobina.

5.1. Paràmetres de disseny d'una bobina

5.1.1. El conductor

Els conductors que s'empren per a aquests tipus d'aplicacions solen ser conductors de coure buits o foradats (*hollow conductors*). Aquests conductors disposen d'un conducte central per a la refrigeració, de manera que per dins del conductor hi circula líquid refrigerant. És a dir, el propi conductor és alhora el tub a través del qual hi passa el refrigerant per a evitar sobreescalfaments. Gràcies a aquest disseny, s'aconsegueix una millor evacuació de la calor emesa durant la circulació de corrent elèctric a través del conductor.

Aquest conductor pot ser de secció rectangular o quadrada i se'n troben de moltes mides diferents. Les seccions presenten les arestes arrodonides i al mig s'hi troba el canal per a la circulació de fluid. En tots els casos, la secció del canal és circular i el seu diàmetre varia segons la secció que tingui el conductor. Es disposa del catàleg de l'empresa que fabrica els conductors, per tant, es coneixen les diferents seccions que s'hi fabriquen i que es poden emprar per al disseny de la bobina.

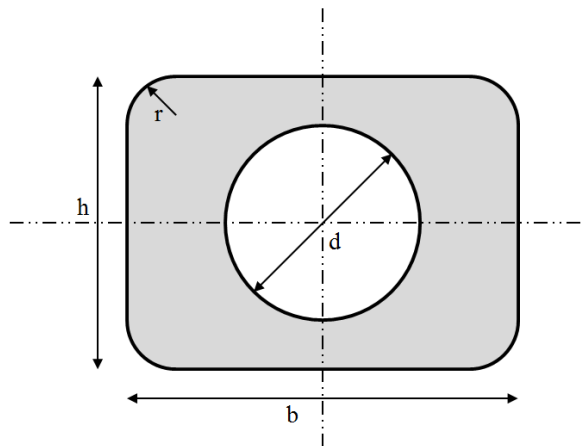


Figura 5.1. Secció d'un conductor buit

A la Figura 5.1 s'hi presenten totes les dimensions que caracteritzen la secció del conductor. Coneixent aquestes dades es poden calcular l'àrea de coure del conductor (A_{Cu}) i l'àrea que es destina la circulació de fluid (A_{H_2O}):

$$A_{Cu} = b \cdot h - \frac{\pi}{4} d^2 - (4 - \pi) \cdot r^2, \quad (5.1)$$

$$A_{H_2O} = \frac{\pi}{4} d^2. \quad (5.2)$$

El material amb el qual es fabriquen els conductors és coure sense oxigen. Es tracta d'un aliatge format principalment per coure d'alta puresa que s'usa en aplicacions que requereixen alta conductivitat elèctrica i tèrmica. A més, pot unir-se amb qualsevol mètode de soldadura i pot corbar-se i deformar si es requereix. El fluid refrigerant que circula per l'interior dels conductors buits és aigua desmineralitzada. Per últim, un cop fet el muntatge de la bobina, se'n recobreix la superfície exterior amb una capa resina epoxi per tal que faci d'aïllament.

A l'inici del disseny es coneixen la densitat de corrent J de la bobina i la secció transversal de la bobina A_{Total} que han estat determinades durant la modelització magnètica de l'ondulador. Per tant, es coneix el corrent total que ha de circular per la secció transversal de la bobina i que és

$$I_{Total} = J \cdot A_{Total}. \quad (5.3)$$

Alhora, aquest corrent total es pot expressar com

$$I_{Total} = N \cdot I, \quad (5.4)$$

On N és el nombre d'espises total i I és el corrent que circula a través d'una espira. El valor d' N es fixa un cop s'escull el conductor.

Durant la modelització magnètica, es simulen les bobines com si tota la seva secció fos de material conductor i amb una densitat de corrent J uniforme. En realitat, no tota la secció de la bobina disposa de material conductor. A part del coure, hi ha espai per a la circulació del líquid refrigerant, per a l'aïllament i, també, cal deixar un cert espai de marge entre les espises. Per tant, la densitat de corrent real que circula pels conductors no correspon amb la utilitzada durant la modelització. Aquesta densitat de corrent real pot ser expressada com

$$J_{real} = \frac{J \cdot A_{Total}}{A_{Cu Total}}, \quad (5.5)$$

on $A_{Cu Total}$ és la secció de coure total, és a dir, l'àrea de material conductor que hi ha en una secció transversal de la bobina. Per tant,

$$A_{Cu Total} = N \cdot A_{Cu}. \quad (5.6)$$

5.1.2. Tipus de bobines

Existeixen dues tècniques per a construir les bobines. Les bobines poden ser bobines contínues, és a dir, estar formades per un únic fil conductor que realitza les voltes necessàries fins a completar la bobina. L'altra opció és subdividir la bobina en diverses parts o *pancakes*. Un *pancake* és una bobina amb un nombre d'espises menor i un conjunt de *pancakes* conforma la bobina sencera. Els *pancakes* es col·loquen apilats l'un damunt de l'altre en la direcció de l'eix de les bobines per tal de conformar la bobina.

Els *pancakes* es connecten elèctricament entre ells en sèrie, mentre que el seu sistema de refrigeració es connecta en paral·lel. D'aquesta manera, s'aconsegueix que el corrent elèctric sigui el mateix que el previst per a una bobina contínua, però canvien els paràmetres necessaris per a la refrigeració del conductor. L'ús de diversos *pancakes* permet que la instal·lació de bombeig del líquid refrigerant pugui proporcionar les prestacions requerides,

però el muntatge d'un conjunt de *pancakes* és més complex que el d'una bobina contínua ja que la quantitat de connexions entre conductors augmenta.

5.1.3. Paràmetres de refrigeració

Els dos paràmetres de refrigeració que cal determinar són el flux de líquid refrigerant que ha de circular pel conductor i la diferència de pressió que pateix el fluid durant la circulació. Aquests dos paràmetres es calculen per a un *pancake* i, a continuació, es poden calcular per a tota una bobina. Cal remarcar que una bobina contínua pot ser considerada com una bobina formada per un únic *pancake*.

Considerant el conductor de coure com un conducte aïllat exteriorment que produeix una potència calorífica constant, es pot calcular l'augment de temperatura ΔT que pateix el fluid refrigerant des de l'entrada al conducte fins que en surt. En aquest cas, l'augment de temperatura és lineal i segueix la següent expressió [11]:

$$\Delta T = \frac{P}{Q \cdot \rho \cdot C_p}, \quad (5.7)$$

on P és la potència tèrmica total emesa al llarg del conductor, Q és el flux de refrigerant, ρ és la densitat de l'aigua i C_p és la capacitat calorífica que per a l'aigua és $C_p = 4180 \text{ J/K}$.

La potència tèrmica es considera $P = R \cdot I^2$. Per tant, l'expressió es pot escriure com

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2}{Q \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{0,06 \cdot R \cdot I^2}{4,2 \cdot Q}. \quad (5.8)$$

I d'aquesta expressió es determina el flux que circula per un *pancake*:

$$Q [\text{l/min}] = \frac{0,06 R [\Omega] I [\text{A}]^2}{4,2 \Delta T [\text{K}]}, \quad (5.9)$$

on Q és el flux de fluid que circula pel conductor, ΔT és l'augment de temperatura que experimenta el fluid durant la circulació pel *pancake*, I és el corrent elèctric que circula a través del conductor i R és la resistència elèctrica del *pancake*.

La resistència elèctrica del *pancake* es pot determinar de la següent manera:

$$R = l \frac{\rho_{Cu}}{A_{Cu}}, \quad (5.10)$$

on l és la longitud del conductor del *pancake*, A_{Cu} és la secció de coure del conductor i ρ_{Cu} és la resistivitat elèctrica del coure.

La resistivitat del coure depèn de la temperatura a la qual es troba el material, com més elevada és la temperatura del coure, major resistivitat presenta. Per exemple, a temperatura ambient la resistivitat del coure és $\rho_{Cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega/m$, en canvi, a 50 °C, la resistivitat és de $\rho_{Cu} = 1,95 \cdot 10^{-8} \Omega/m$. Per als càlculs és preferible usar la resistivitat del coure ρ_{Cu} a 50 °C. Es tracta d'una temperatura massa elevada i no es vol que el conductor assoleixi aquests nivells tèrmics, però permet realitzar els càlculs considerant la situació més desfavorable que es pot presentar.

Un cop determinat el flux, es pot calcular la diferència de pressió mitjançant la següent expressió empírica [9]:

$$\Delta p[\text{bar}] = l[\text{m}] \cdot (8 \cdot Q[\text{l/min}] \cdot A_{H_2O}[\text{mm}^2]^{-1,334})^{1,79}, \quad (5.11)$$

on ΔP és la diferència de pressió del fluid al llarg de la circulació pel *pancake* i A_{H_2O} és la secció d'un conductor a través de la qual hi circula el fluid. Conèixer la diferència de pressió que pateix el fluid al llarg del conductor, permet saber amb quina pressió s'ha de bombejar el fluid per tal que pugui circular pel conductor.

A continuació, cal determinar quin valor tenen els dos paràmetres (Q i Δp) per a una bobina sencera. Si es considera que una bobina disposa de m *pancakes*, el flux i la diferència de pressió totals per a una bobina són

$$Q_{Total} = m \cdot Q, \quad (5.12)$$

$$\Delta p_{Total} = \Delta p. \quad (5.13)$$

Aquestes expressions indiquen que el flux total que cal proporcionar és la suma del flux que circula per cada *pancake*, mentre que la pressió total que cal subministrar és la mateixa que requereix un sol *pancake*.

El flux total que cal proporcionar a una bobina és el mateix tant si s'empra una bobina contínua com si es divideix en *pancakes*. En canvi, la diferència de pressió es veu modificada quan s'usen *pancakes* i posa de manifest el benefici que aporta l'ús dels *pancakes*. És necessari subdividir la bobina en diverses parts o *pancakes* en cas que la diferència de pressió ΔP al llarg de tota la bobina contínua sigui massa elevada i no pugui ser proporcionada per la instal·lació.

Per tal que tots els *pancakes* rebin el mateix flux i pateixin la mateixa pèrdua de pressió, cal que la llargada del conductor de tots els *pancakes* sigui igual. Per tant, no es pot escollir un nombre arbitrari de *pancakes*.

Finalment, cal tenir en compte les especificacions referents a la refrigeració (Apartat 3.1). Les instal·lacions presents al sincrotró permeten proporcionar com a màxim un flux d'aigua de 30 l/min i una pressió de 10 bar. En cap cas aquests valors límit poden ser sobrepassats. A més, per tal que les bobines no pateixin un escalfament excessiu és decideix que l'increment de temperatura ΔT que pot patir el fluid és de 10 °C.

5.1.4. Paràmetres elèctrics

Cal assegurar que els paràmetres elèctrics que requereixen les bobines són assolibles. A més, segons les especificacions (Apartat 3.1) el corrent elèctric que es pot proporcionar amb els dispositius disponibles està limitat a uns 300 A.

Idealment, el circuit de la bobina pot ser considerat com una font de tensió connectada a una resistència i a una inductància. La resistència representa tota la resistència elèctrica del conductor i la inductància fa referència al bobinat.

L'ondulator s'estudia a un corrent continu constant. Quan s'assoleix l'estat estacionari, tots els elements presents al circuit es comporten de manera estable i només la resistència consumeix potència elèctrica. Per tant, en l'estat estacionari, tota l'energia subministrada per la font de tensió es perd per efecte Joule.

Analitzant el circuit, es pot calcular la font de tensió necessària per a alimentar una bobina:

$$V = I \cdot R_{bobina}. \quad (5.14)$$

També es pot calcular la potència necessària per a alimentar una bobina:

$$P = V \cdot I = R_{bobina} \cdot I^2. \quad (5.15)$$

5.2. Limitacions i paràmetres lliures

Limitacions

A continuació es mostren les dades que prèviament són conegudes així com les limitacions i restriccions que cal tenir en compte:

- Dimensions de la bobina: Secció $18 \times 145 \text{ mm}^2$.
- Paràmetres elèctrics: $J = 15,5 \text{ A/mm}^2$, $I \leq 300 \text{ A}$ i $\rho_{Cu} = 1,95 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$.
- Paràmetres de refrigeració: $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q < 30 \text{ l/min}$ i $\Delta p < 10 \text{ bar}$.

Paràmetres lliures

Tot seguit s'enumeren i comenten els paràmetres que prèviament no estan especificats i que permeten acabar escollint i definint el tipus de bobina i el tipus de conductor a emprar:

- Nombre N d'espines de la bobina
- Nombre m de *pancakes* de la bobina
- Secció de coure $A_{Cu \text{ Total}}$
- Secció A_{H_2O} d'un conductor a través de la qual hi circula el fluid

Per tal d'aconseguir mantenir el corrent elèctric per sota del llindar establert, cal que el nombre N d'espines sigui el més gran possible. Tanmateix, un nombre elevat d'espines augmenta la diferència de pressió ΔP . Si la secció A_{H_2O} és gran, la diferència de pressió es redueix. A més, sempre es pot recórrer a augmentar el nombre m de *pancakes* per tal de disminuir la diferència de pressió.

Un bon aprofitament de l'espai destinat a les bobines permet augmentar l'àrea de coure $A_{Cu\ Total}$. L'àrea de coure influencia a la potència elèctrica i, alhora, al flux de refrigeració necessari. Per tant, com major sigui l'àrea $A_{Cu\ Total}$, menor serà la potència consumida.

Així que és important aconseguir un bon aprofitament de l'espai i això està estretament relacionat amb la secció de conductor que s'escull. Cal remarcar que no totes les seccions de conductor possibles permeten aprofitar plenament l'espai destinat prèviament a les bobines.

5.3. Solució escollida

El conductor

La solució escollida és un conductor de $3 \times 4\text{ mm}^2$ amb canal pel refrigerant de 2 mm de diàmetre i es tracta del conductor més petit que es pot escollir. A la Figura 5.2 s'observa la secció del conductor amb totes les dimensions pertinents.

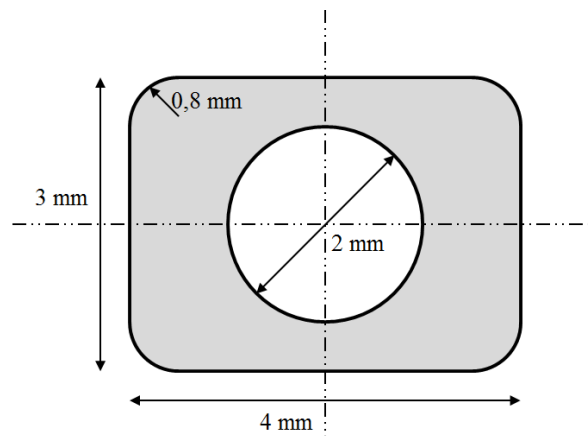


Figura 5.2. Plànol de la secció de conductor escollida

Pel que fa a la col·locació del conductor al voltant del pol, cal destacar que entre espira i espira s'hi deixa 0,5 mm de marge per tal de tenir en compte les toleràncies que presenti el conductor, així com imperfeccions o desajustos que puguin presentar-se. A més, es deixa un mil·límetre exterior de marge per a deixar lloc per a la resina epoxi que recobreix les bobines. Tot plegat, permet col·locar 5 espires en la direcció radial i 32 en la direcció axial que fan un total de $N = 5 \times 32 = 160$ espires. Cada bobina es divideix en 8 *pancakes* amb 5 espires radialment i 4 axialment (Figura 5.3 i Figura 5.4).

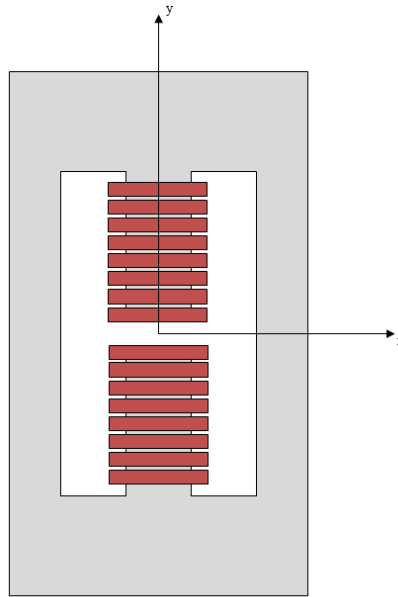


Figura 5.3. Representació d'una unitat amb les dues bobines formades per 8 *pancakes* cada una

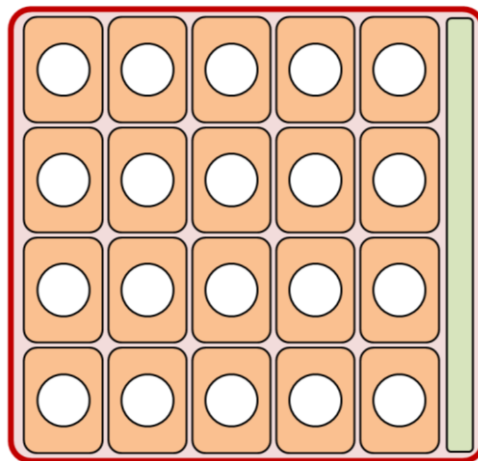


Figura 5.4. Secció d'un *pancake* amb els conductors i la superfície aïllant en verd

Aquesta distribució de les espines permet que aproximadament el 50% de l'àrea destinada a les bobines sigui ocupada pel coure. És a dir, l'àrea de coure total $A_{Cu\ Total}$ és de $1329,6\text{ mm}^2$ i la densitat de corrent que realment circula pel conductor és $31,3\text{ A/mm}^2$. Per últim, l'àrea A_{H_2O} d'un conductor és $3,14\text{ mm}^2$.

Paràmetres de refrigeració

El flux total que circula a través d'una bobina és $Q_{Total} = 7,32\text{ l/min}$, que es troba per sota de la limitació establerta i cada *pancake* presenta una resistència elèctrica $R = 9,48 \cdot 10^{-3}\ \Omega$.

Amb l'ús dels *pancakes*, s'aconsegueix que la diferència de pressió no superi el límit indicat. En total, la pressió necessària per al fluid refrigerant és $\Delta p = 9,27$ bar.

Paràmetres elèctrics

La intensitat que circula a través del conductor és $I = 260$ A i no supera el límit indicat a les especificacions (Apartat 3.1). La resistència total que presenten dues bobines d'una unitat és de $0,151 \Omega$, la font de tensió ha de proporcionar $39,2$ V per a les dues bobines i la potència consumida és de $10,2$ kW.

Per a l'alimentació elèctrica de les bobines, s'empraran fonts independents per a cada unitat, és a dir, per a cada conjunt de dues bobines d'una unitat. El motiu pel qual s'escull aquest tipus d'alimentació són:

- Es poden emprar fonts d'alimentació comercials, ja que el voltatge que requereixen no és gaire elevat. L'ús de fonts comercials comporta un estalvi econòmic en la seva compra.
- Permet ajustar el corrent per a cada unitat per tal d'obtenir el camp magnètic adequat independentment de les imperfeccions o diferències individuals de cada unitat.
- En cas que s'espatlli una de les fonts d'alimentació, l'avaria només afecta a una de les unitats de l'ondulator i no es veu afectat tot el dispositiu.

L'inconvenient que presenta utilitzar aquest tipus d'alimentació és la quantitat de fonts que s'han de tenir sota control independentment l'una de l'altra. Com que l'ondulator té de 40 unitats, disposarà de 40 fonts.

6. Disseny mecànic conceptual

Per a realitzar un disseny mecànic conceptual de l'ondulator s'empra un programa de disseny assistit per ordinador (CAD). Concretament, el programa utilitzat és NX.

El disseny realitzat és conceptual. És a dir, aporta informació sobre l'aspecte i les dimensions dels diversos components de l'ondulator, permet observar la distribució i col·locació de les peces i garantir espai suficient per a tots els components. Es representa el conjunt d'elements que permeten generar el camp magnètic de l'ondulator. Això inclou el jou, les bobines amb tots els conductors i les corresponents connexions elèctriques i de refrigeració entre conductors.

6.1. Muntatge de les bobines

Cal determinar com es construeixen els *pancakes* i com es realitza la distribució i connexió dels conductors.

6.1.1. Bobinatge dels *pancakes*

Els *pancakes* estan formats per un únic conductor que s'enrotlla i l'enrotllament del conductor es realitza per pisos. Primerament s'enrotlla el conductor radialment en forma d'espiral fins a assolir el nombre d'espines que conformen la secció en direcció radial. A continuació es desplaça el conductor axialment cap amunt i es torna a enrotllar radialment. I així successivament fins a completar el nombre d'espines en la direcció axial que hagi de tenir el *pancake*.

Tenint en compte que les bobines necessàries per a l'ondulator empren quasi tot l'espai del que disposen, cal tenir especial cura en la manera com es produeix l'enrotllament dels *pancakes*. Cal remarcar que cada desplaçament axial requereix més espai en la direcció radial de l'inicialment previst. A més, també s'ha d'aconseguir que els conductors d'entrada i sortida no ocupin espai destinat teòricament als *pancakes* adjacents.

L'enrotllament de les bobines escollit es mostra a la Figura 6.1. Amb aquesta distribució, els salts en l'enrotllament del conductor es produeixen la zona corbada del *pancake* i els conductors d'entrada i sortida no destorben als altres *pancakes*.

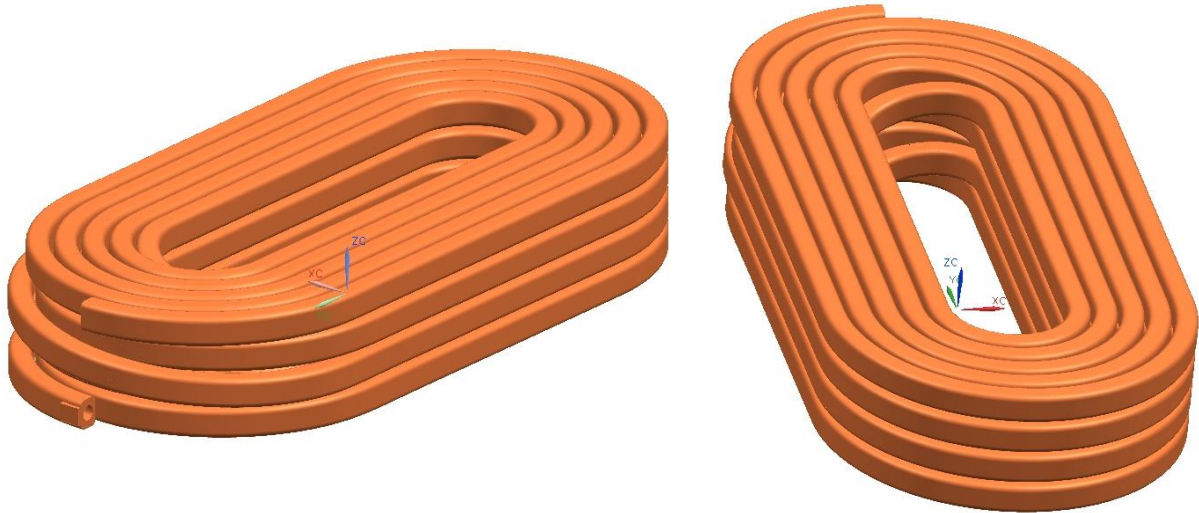


Figura 6.1. Representació d'un *pancake* des de dues perspectives diferents

6.1.2. Sortida dels conductors

Un cop conegut el disseny de les bobines, cal comprovar que tots els conductors dels *pancakes* es poden extreure de l'interior de l'ondulator i s'ha de determinar la disposició d'aquests conductors. Un cop extrets, a l'exterior del dispositiu, es realitzen totes les connexions necessàries, tant de refrigeració com elèctriques.

Cada unitat consta de 2 bobines, cada bobina consta de 8 *pancakes* i cada *pancake* està format per un únic conductor, els extrems del qual s'han d'extreure cap enfora. Un extrem correspon a l'entrada i l'altre a la sortida. En total, una unitat consta de 32 conductors, 16 de cada bobina.

Primerament es comprova que hi hagi espai suficient per a evacuar els conductors. Per a això, es calcula l'àrea a través del qual podrien sortir tots els conductors d'una bobina. Cal que aquesta àrea sigui més gran que la suma de les seccions dels conductors.

- L'espai a través del qual podrien sortir els conductors s'observa a la representació d'una unitat de l'ondulator i les seves unitats adjacents. Per a cada unitat, l'espai de

sortida són vuit àrees, que fan un total de $8 \times (12,5 \times 26,5) \text{ mm}^2$. A la Figura 6.2 s'observen quatre àrees de sortida dibuixades en groc. A l'altra banda s'hi trobarien les altres quatre.

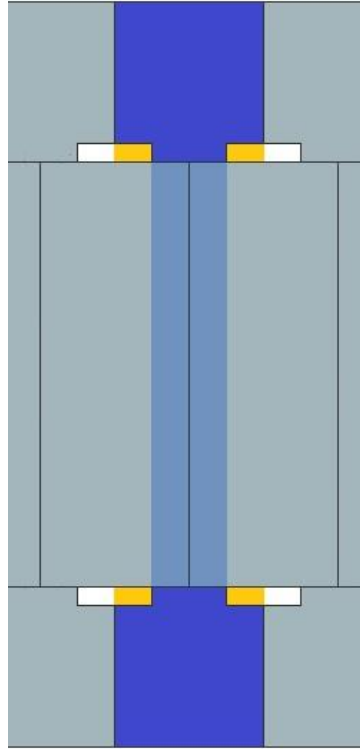


Figura 6.2. Representació d'unes quantes unitats de l'ondulator. En groc, àrees de sortida de la unitat pintada de blau

- L'àrea que requereixen els conductors és de $32 \times (3,5 \times 4,5) \text{ mm}^2$ ja que han de poder sortir un total de 32 conductors de secció $4 \times 3 \text{ mm}^2$ tenint en compte que es deixa també un marge de tolerància de 0,5 mm entre conductors.

L'espai de sortida és superior a les seccions dels conductors. Per tant, es garanteix que és possible extreure tots els conductors. De fet, cada conjunt de 16 conductors d'una bobina necessita únicament dues àrees de sortida d'una unitat.

Un cop garantit que es poden extreure els conductors, es proposa ara una manera de distribuir els conductors i de fer-los sortir de forma endreçada.

Quan l'ondulator s'instal·li a l'anell d'emmagatzematge, una banda de l'ondulator quedarà accessible des del passadís que recorre el túnel del l'anell d'emmagatzematge, mentre que l'altra banda quedarà orientada de cara a la paret i, per tant, serà menys accessible. Per tal de facilitar l'accés als conductors, els conductors s'han d'extreure només a través d'una de les

bandes laterals i per la part superior del dispositiu. En el cas de les unitats que generen el camp horitzontal, els conductors s'extreuen per la part superior del dispositiu, en canvi, per les unitats que generen el camp vertical es farà la sortida dels conductors lateralment.

Per tal de mantenir els conductors endreçats i facilitar les diverses connexions en sèrie i en paral·lel entre els conductors dels diversos *pancakes*, es decideix dedicar les dues àrees superiors als conductors de la bobina superior i les altres dues àrees a la bobina inferior. Una de les dues àrees es destina als vuit conductors d'entrada i l'altra als vuit conductors de sortida. A l'Annex F es mostren representacions de la sortida dels conductors.

6.1.3. Connexions

Les connexions entre els diversos conductors es realitzen sempre a l'exterior de l'ondulator ja que són delicades i tendeixen a patir problemes. Per tant, cal que s'hi pugi accedir amb facilitat per a dur a terme les reparacions necessàries.

Pel que fa a les connexions del circuit de refrigeració, els vuit conductors d'entrada reben una alimentació conjunta de refrigerant i a la sortida el refrigerant dels vuit conductors es recull també en un sol conducte. Aquests conductes que alimenten els conductors estan connectats al circuit principal de refrigeració de la instal·lació. A la Figura 6.3, en blau, s'observen un parell de connectors amb un canal de refrigeració per una banda i vuit per l'altra.

Pel que fa a la connexió elèctrica, és necessari connectar en sèrie el conductor de sortida d'un *pancake* amb el conductor d'entrada del següent *pancake*. També, cal connectar l'últim conductor de sortida amb el primer conductor d'entrada de l'altre pol de la unitat ja que les dues bobines estan connectades en sèrie i alimentades per una mateixa font d'alimentació. El primer conductor d'una bobina i l'última de l'altra bobina s'han de connectar a la font d'alimentació.

Aquestes connexions elèctriques es realitzen amb conductors de coure sense conducte de refrigeració que es solden entre els conductors que es volen connectar elèctricament. No cal que aquests conductors disposin de refrigeració, ja que es tracta de trams de conductors petits.

A la Figura 6.3 es mostra un exemple de connexions elèctriques i de refrigeració d'una unitat.

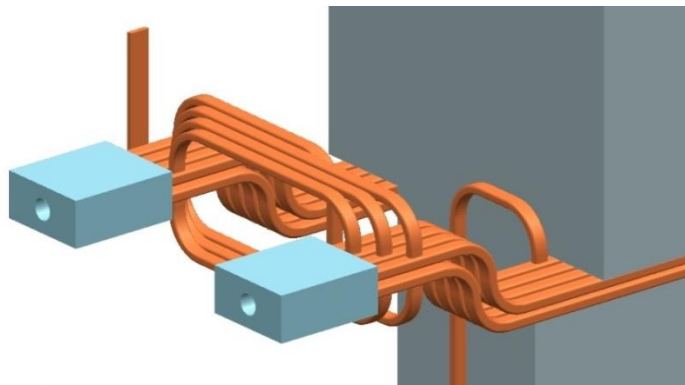


Figura 6.3. Connexions elèctriques i de refrigeració d'una bobina.

6.2. Representació de l'ondulator

Finalment, es representa l'ondulator sencer amb tots els elements que contribueixen a generar el camp magnètic. A la Figura 6.4 es mostra una vista general de l'ondulator. Es poden observar les diverses unitats que conformen l'ondulator. S'aprecien els conductors d'entrada i de sortida i les diverses connexions i es valida que hi ha espai suficient per a tots els components.

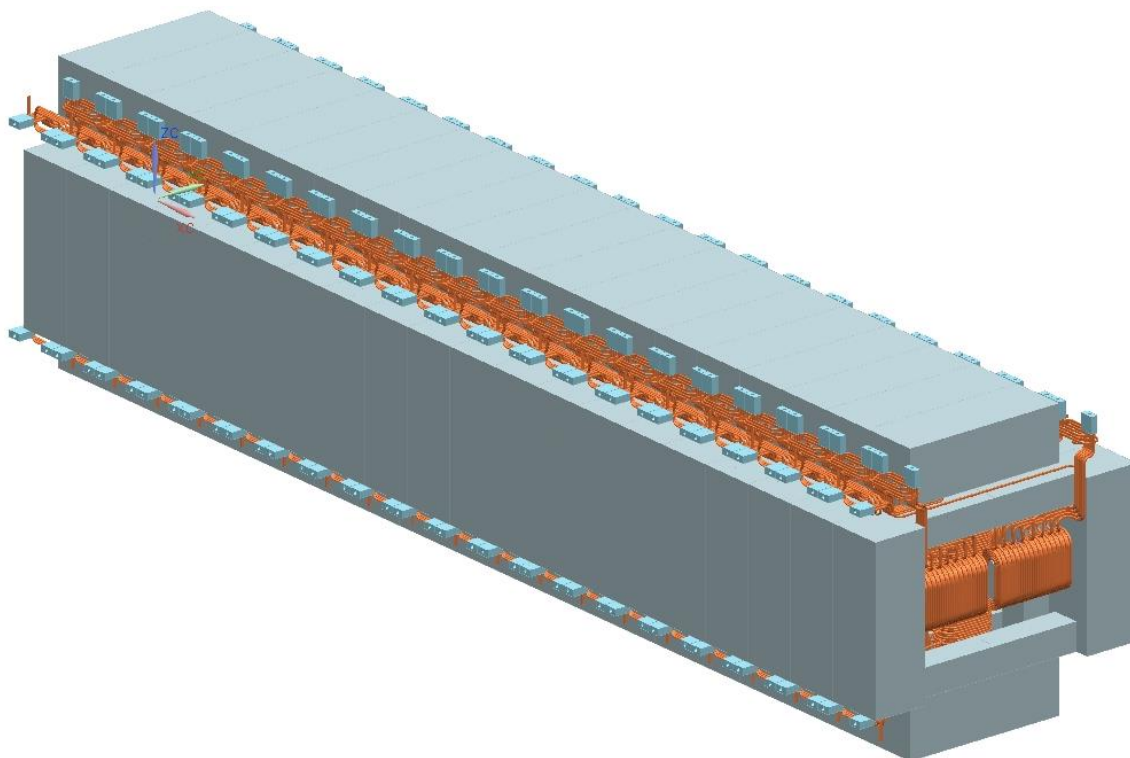


Figura 6.4. Vista general de l'ondulator

A l'Annex F es mostren més imatges de la representació de l'ondulator amb NX.

7. Planificació temporal i costos

Planificació del treball

Les tasques que s'han dut a terme durant el treball són:

A: Documentació prèvia

B: Aprenentatge del programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D

C: Simulacions de l'ondulator i ajust de paràmetres

D: Disseny de les bobines

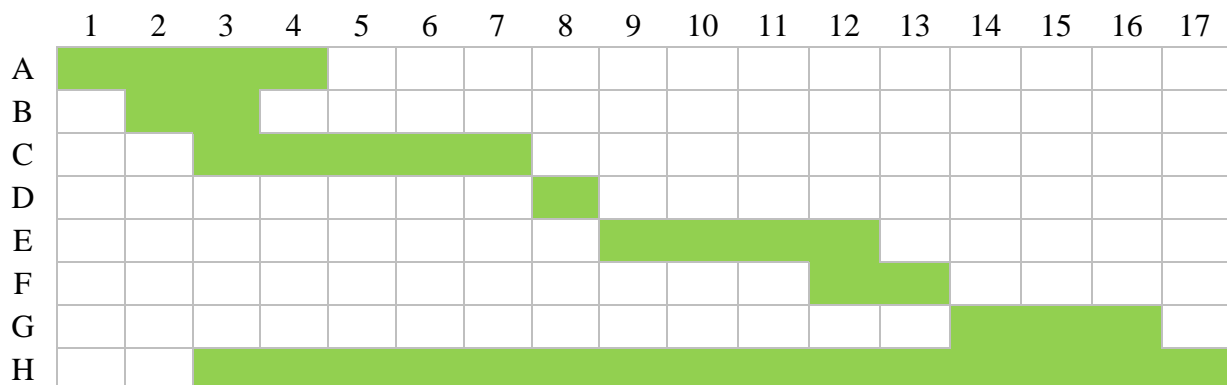
E: Estudis sobre la llum de sincrotró generada, la saturació, el perfil del pol i la mida de l'entreferro

F: Aprenentatge del programa de disseny assistit per ordinador NX

G: Disseny conceptual i representació de l'ondulator

H: Redacció de la memòria del treball

La planificació del treball per setmanes es mostra a la Taula 3.1.



Taula 7.1. Diagrama de Gant de les tasques (A-H) del treball durant les setmanes (1-17)

Cicle de vida de l'ondulator

Des d'un punt de vista més global, quan es planifica un dispositiu d'inserció cal tenir en compte tot el cicle de vida del producte. A la Figura 7.1 es mostra un esquema general de les etapes del cicle de vida d'un imant destinat a un accelerador de partícules, ja sigui un imant corbador, quadrupolar, sextupolar o d'un dispositiu d'inserció. També s'hi mostra de forma més concreta els passos a seguir durant el disseny i càlculs d'un ondulator.

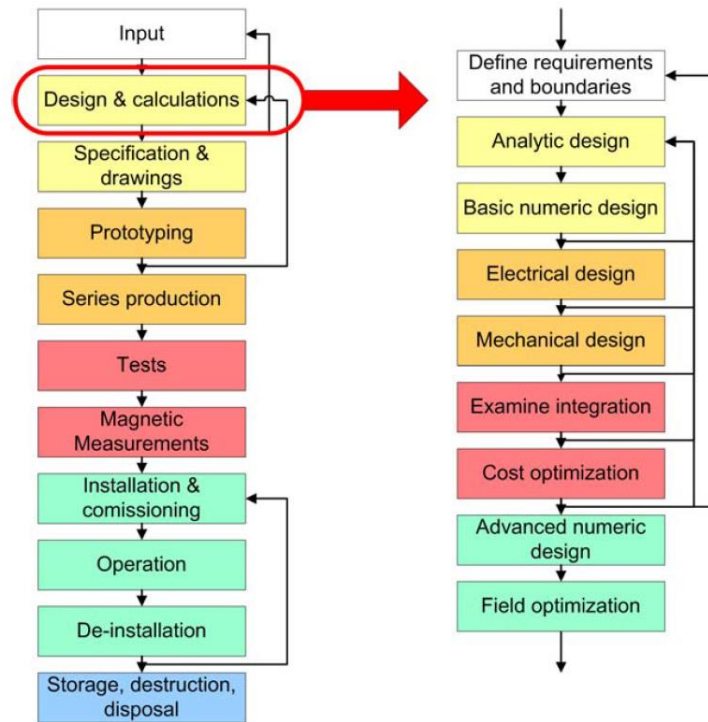


Figura 7.1. Exemple de cicle de vida d'un imant [9]

Cost de l'ondulator

Per a calcular el cost de fabricació dels components principals de l'ondulator (jou i bobines), cal tenir en compte el cost de del material i el cost de manufactura. A la Taula 7.2 es mostra la quantitat de components que conformen l'ondulator i d'altres característiques d'interès per a calcular els costos. A la Taula 7.3 es mostra una estimació dels costos dels materials i de manufactura.

Component	Nombre de components a l'ondulator	Volum d'un component	Material	Densitat
Jou	40	8,319 dm ³	Acer	7,60 – 7,85 kg/dm ³
<i>Pancakes</i>	640	0,0336 dm ³	Coure	8,94 kg/dm ³

Taula 7.2. Característiques dels components de l'ondulator [9]

Material	Cost Material	Cost Manufactura
Acer	1,0 – 1,5 €/kg	Fins a 300 €/kg
Coure	10 – 15 €/kg	Fins a 300 €/kg

Taula 7.3. Estimació de costos per a imants estàndards (Any 2010) [9]

A partir de les Taules Taula 7.2 i Taula 7.3, es pot fer una estimació del cost de fabricació de l'ondulator. Concretament, s'estima que el cost de l'ondulator serà d'entre 500.000 i 800.000 €.

Cal tenir en compte que els costos de fabricació se sumen a altres despeses del producte durant el seu cicle de vida, com per exemple:

- Disseny i càlculs
- Adquisició de les fonts d'alimentació, fabricació dels sistemes mecànics i altres sistemes
- Instal·lació i posada a punt
- Consum energètica: electricitat i refrigeració
- Manteniment
- Desinstal·lació i desballestament

8. Impacte mediambiental

L'impacte ambiental de l'ondulator es subdivideix en tres tipus:

Fabricació, desballestament i reciclatge: Els materials principals de l'ondulator són acer i coure. Tot dos materials són utilitzats àmpliament en la fabricació d'objectes i aparells de tota mena. Un cop acabada la seva vida útil, tant l'acer com el coure són reciclables.

Consum energètic: En un estat de funcionament habitual, cal incloure-hi el consum d'energia elèctrica per a la generació del camp magnètic i, també, la despesa energètica en refrigeració de les bobines.

La potència elèctrica total que consumeix el dispositiu és $P = 40 \cdot 10,2 = 408$ kW. Aquesta potència en dissipa a causa de l'efecte Joule i és evacuada pel sistema de refrigeració. Tot plegat, comporta que el consum d'energia en funcionament habitual sigui molt elevat.

Emissió de radiacions: Les radiacions que s'emeten en una instal·lació de llum de sincrotró són nocives per a les persones. Per aquest motiu, tota la instal·lació (accelerador lineal, accelerador circular i anell d'emmagatzematge) es troba dins d'un túnel de formigó i es prenen les mesures de seguretat necessàries pertinents.

9. Resum de resultats i conclusions

El present treball està dedicat al disseny magnètic d'un ondulator, de les seves bobines i a anàlisi d'alguns aspectes mecànics de l'ondulator. L'ondulator ferromagnètic helicoïdal estudiat ha de formar part de la futura línia de llum LOREA del sincrotró ALBA i genera una llum discreta en l'espectre dels raigs X tous i ultraviolats.

Més concretament, s'han realitzat les tasques següents:

- 1) S'ha dut a terme la modelització magnètica de l'ondulator mitjançant el programa d'anàlisi d'elements finits OPERA-3D i s'ha analitzat detalladament al pla de simetria. El camp magnètic generat per l'ondulator és periòdic i es pot descompondre com la suma de dos camps perpendiculars entre ells.
- 2) S'ha demostrat que el valor màxim del camp magnètic adient per a la producció de llum de sincrotró es pot assolir. Per a assolir aquest valor, cal aprofitar tot l'espai disponible per a les bobines dins del dispositiu i cal emprar un acer que presenti saturació a valors de camp elevats. D'aquesta manera, la densitat de corrent que ha de circular per les bobines no excedeix la capacitat del sistema de refrigeració.
- 3) S'ha obtingut que el camp magnètic d'un pol i la seva integral no són suficientment homogenis a l'obertura física per mantenir adequadament el feix d'electrons en la trajectòria de disseny. Aquest aspecte es millora modificant el perfil del pol i afegint-hi unes falques triangulars als extrems. Amb aquest nou disseny del perfil del pol s'aconsegueix la homogeneïtat especificada.
- 4) S'ha dut a terme el disseny de les bobines. Per a la fabricació de les bobines s'empren conductors buits dins dels quals hi circula el líquid refrigerant. Cada bobina es subdivideix en un conjunt de *pancakes* que es connecten entre ells per a conformar les bobines. S'han garantit les necessitats de refrigeració de la bobina, s'ha comprovat que les bobines poden rebre subministrament elèctric amb fonts d'alimentació convencionals i que el corrent que hi circula es manté per sota del llindar especificat.
- 5) Amb el programa de disseny assistit per ordinador NX s'ha comprovat que tots els conductors de les bobines poden ser extrets de l'ondulator. Un cop fora, es poden realitzar

les connexions elèctriques i de refrigeració pertinents entre conductors. Per últim, s'ha representat l'ondulator, que consta de 10 períodes que fan un total de 40 unitats amb dues bobines cada una.

Com a conclusió, cal remarcar que s'han dut a terme totes les tasques que s'enumeren a l'inici del treball. La informació presentada en aquest treball, juntament amb altra informació relativa a l'ondulator, formarà part del plec de condicions que s'elaborarà per a la construcció i fabricació d'aquest ondulator.

10. Agraïments

Al Pep Campmany el seu suport constant, l'interès i tot el temps dedicat durant la realització del treball. També, tots els aclariments a cadascun dels dubtes que se m'han anat plantejant.

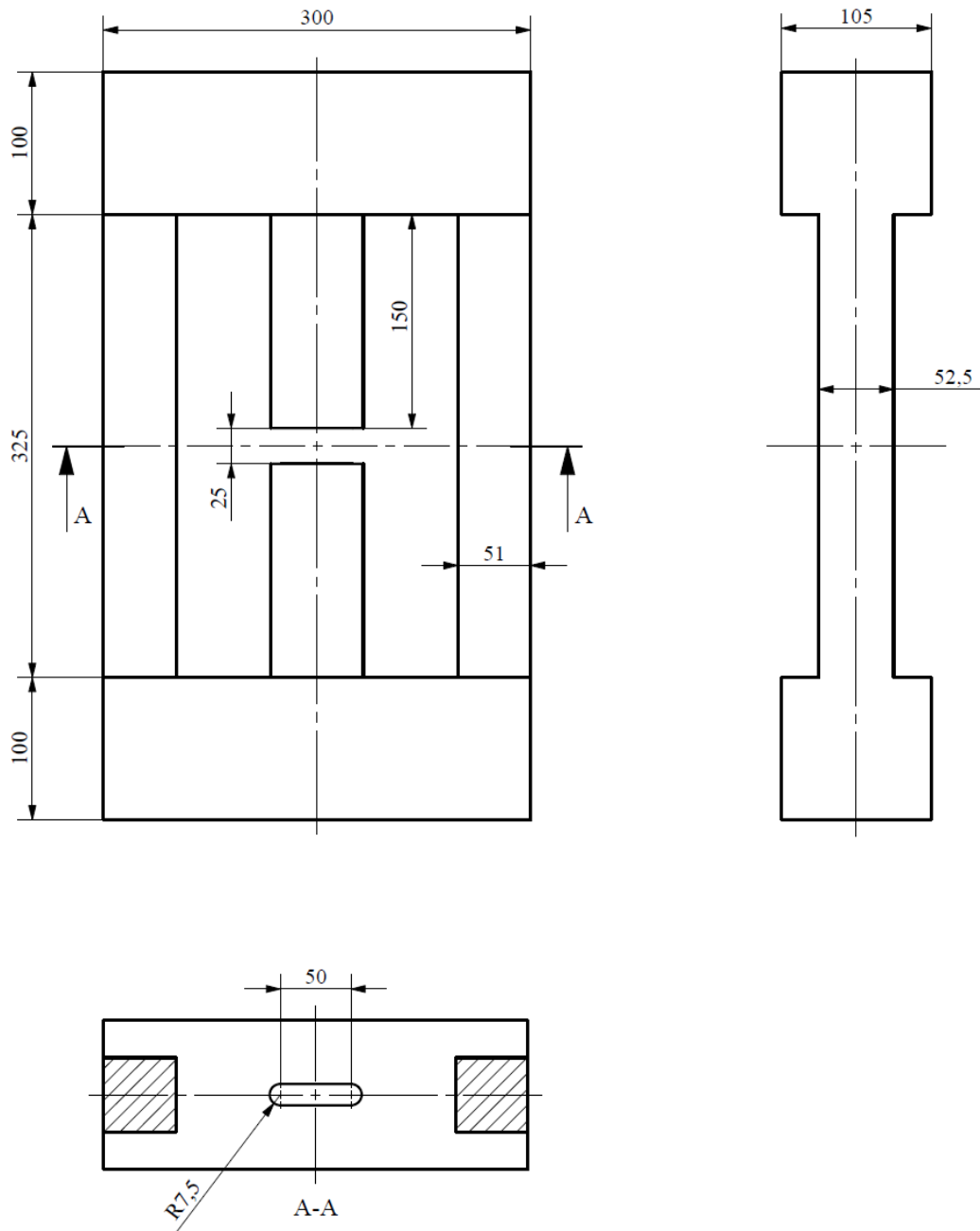
Al Youri Koubychine els consells i les aportacions en el treball, així com les classes introductòries a l'inici de les pràctiques.

Al Valentí Massana totes les explicacions i l'ajuda aportada sobre la modelització magnètica amb l'OPERA-3D.

11. Bibliografia

- [1] CAMPMANY, J. El sincrotró de Barcelona. *Revista de Física*. 1r semestre de 1997, p. 14-21 .
- [2] FERRER, S. El laboratori de llum de sincrotró de Catalunya. *Revista de Física*. 2n semestre de 1993, p. 16-17.
- [3] ARANDA, J. La radiació de sincrotró. *Revista de Física*. 1r semestre de 1992, p. 4-10.
- [4] JUANHUIX, J., CAMPMANY, J. La luz de sincrotrón: la luz que todo lo ve. *A distancia*. Vol. 21, nº 3, Octubre 2003, p. 105-110.
- [5] CAMPMANY, J. Luz de sincrotrón. *Investigación y Ciencia*. Agost 1996. p.82-83.
- [6] MASSANA, V. *Optimització del procés de construcció d'un ondulator d'imants permanents per a una font de llum de sincrotró*. Tesi. Universitat Autònoma de Barcelona, 2013.
- [7] WIEDEMANN, H. *Particle Accelerator Physics I: Basics Principles and Linear Beam Dynamics*. 2a Ed. 2003. Berlin: Springer-Verlag, p.300 i p.326.
- [8] CLARKE, J. A. *The Science and Technology of Undulators and Wigglers*. Ed. 2004. Oxford: Oxford University Press, p. 52-54.
- [9] ZICKLER, T. Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets. *Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: Magnets, Bruges, Belgium, 16-25 June 2009*. Editat per D.Brandt, CERN 2010, p.65-102.
- [10] VECTOR FIELDS. *OPERA-3D. Software for electromagnetic design. User Guide*. Maig 2003. England.
- [11] INCROPRERA, F. P., DE WITT D., *Fundamentos de transferencia de calor*. 4a Ed. 1999. Mèxic: Pearson, p. 431-433.

Annex A. Plànol del jou



Escala 1:5
Unitats en mm

Annex B. Camp magnètic en un període

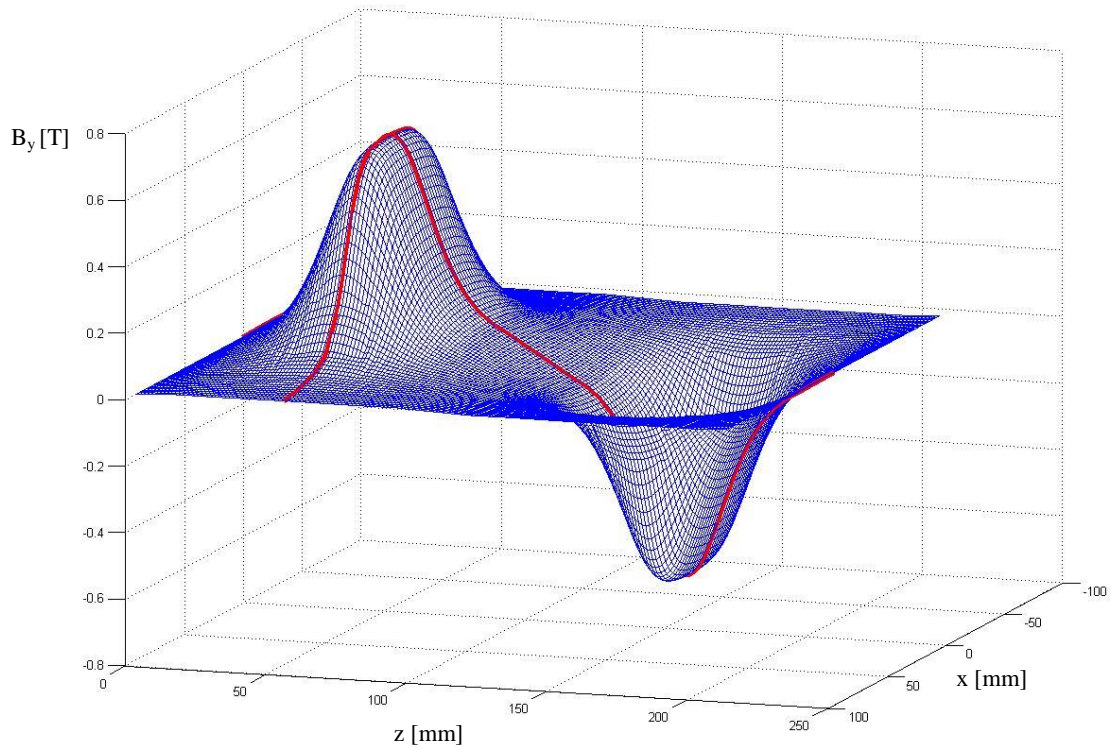


Figura B.1. Representació del camp magnètic B_y en el pla de simetria $y = 0$ en un període de l'ondulator. En vermell, $B_y(0,0,z)$ i $B_y(x,0,0)$.

Annex C. Espectres de la llum de sincrotró

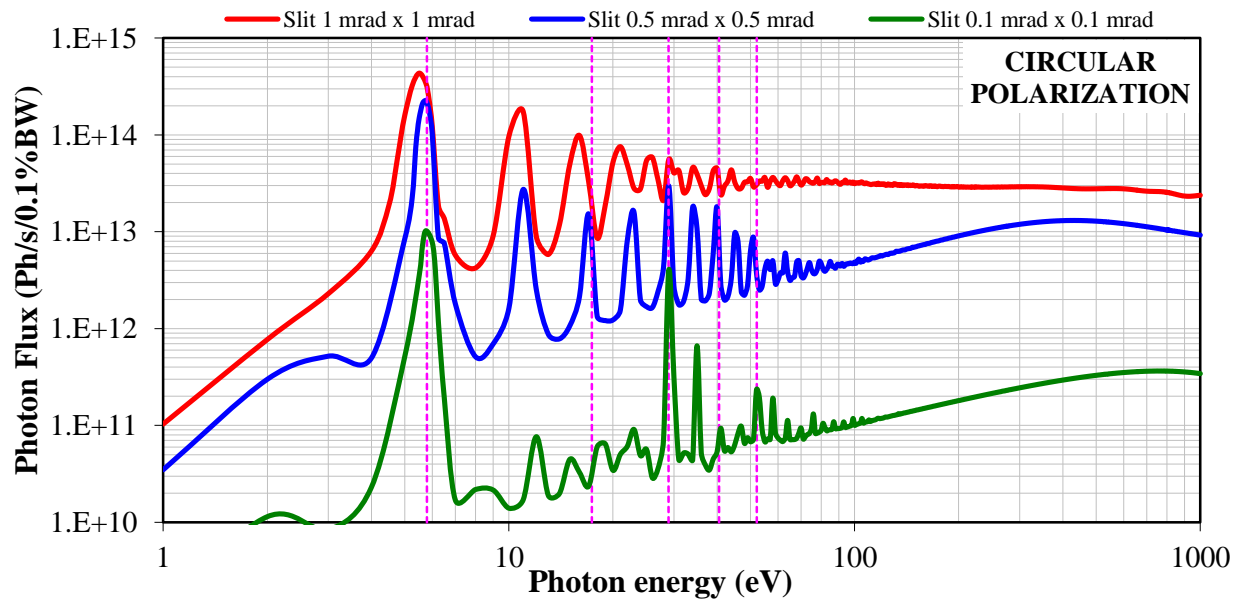


Figura C.1. Representació de l'espectre de llum emesa per a diverses mides d'esclatxa i per a una polarització circular

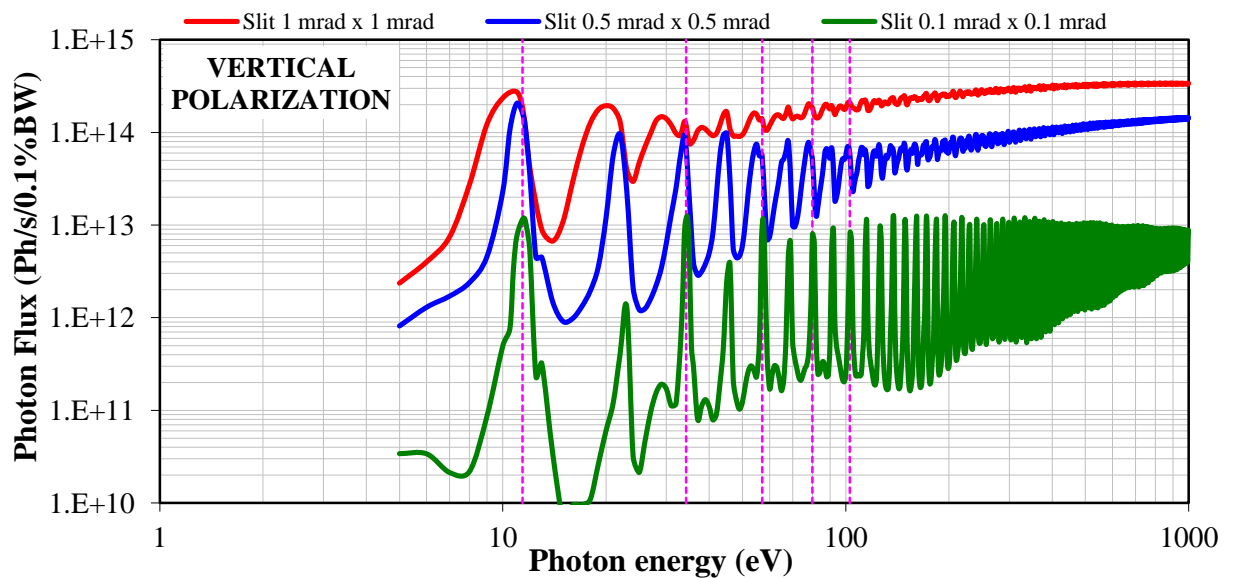


Figura C.2. Representació de l'espectre de llum emesa per a diverses mides d'esclatxa i per a una polarització vertical

Annex D. Homogeneïtat del camp magnètic

Les dimensions que defineixen la falca triangular del perfil del pol retocat són b , la base de la falca, i α , l'angle respecte l'horitzontal que presenta la falca. L'altura de la falca, h , es calcula com $h = b \cdot \tan \alpha$.

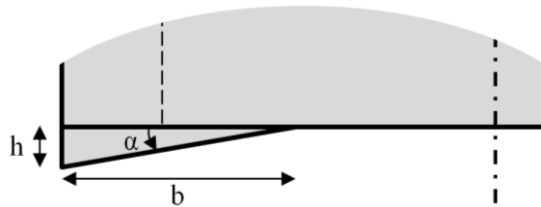


Figura D.1. Representació d'una falca triangular del perfil del pol i les seves dimensions

A continuació, es mostren alguns exemples del camp magnètic $B_y(x)$ per a diferents falques triangulars.

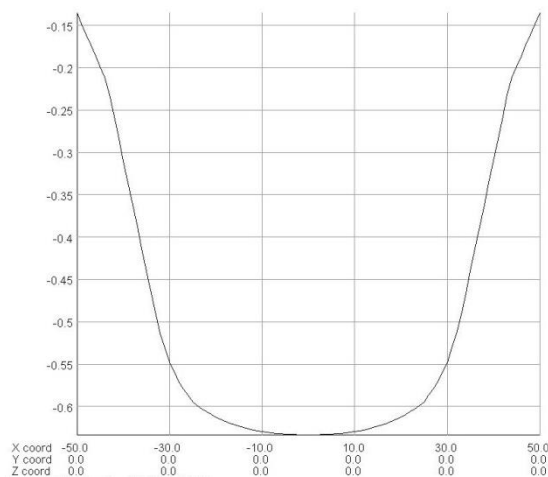


Figura D.2. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 7,5$ mm i $\alpha = 22,5^\circ$

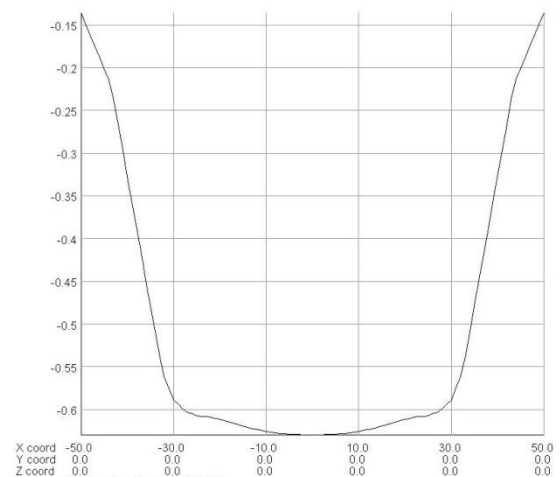


Figura D.3. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 7,5$ mm i $\alpha = 35^\circ$

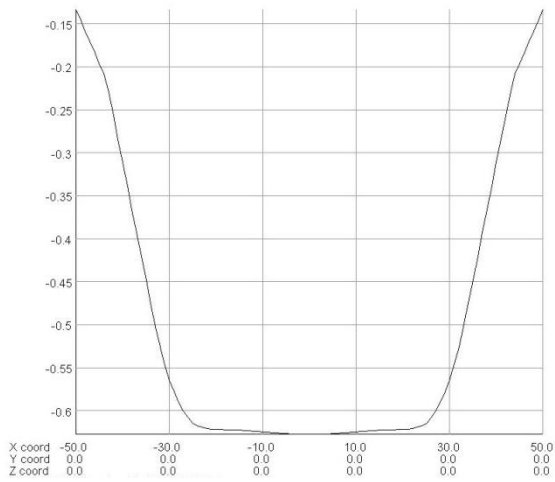


Figura D.4. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 12,5$ mm i $\alpha = 14^\circ$

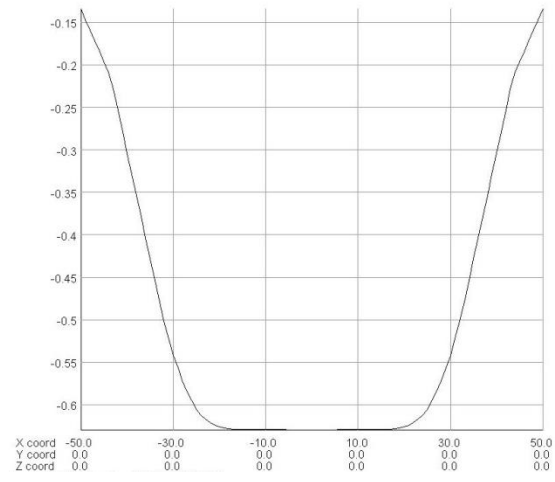


Figura D.6. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 17,5$ mm i $\alpha = 5^\circ$

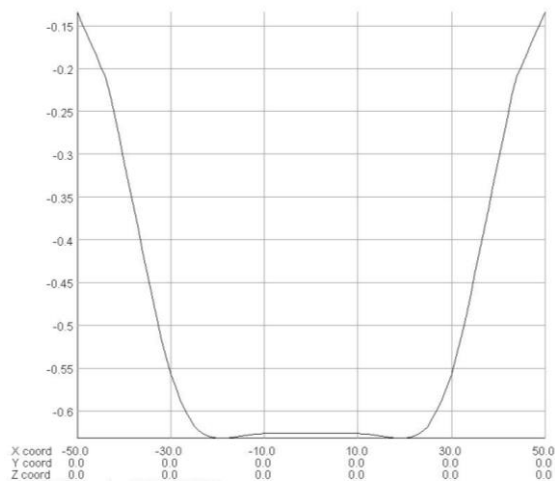


Figura D.5. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 17,5$ mm i $\alpha = 7^\circ$

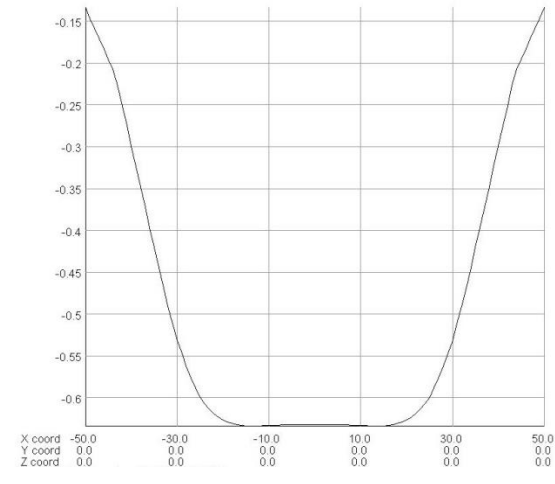


Figura D.7. Camp magnètic $B_y(x)$ [T] per a un perfil de pol amb $b = 22,5$ mm i $\alpha = 2,5^\circ$

Annex E. Saturació

Les dimensions que defineixen el xamfrà del pol retocat són b , la base de la del xamfrà, i α , l'angle respecte l'horitzontal. L'altura del xamfrà, h , es calcula com $h = b \cdot \tan \alpha$.

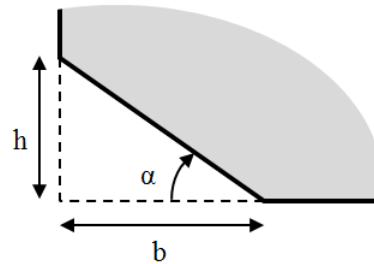


Figura E.1. Representació d'un xamfrà al perfil del pol i les seves dimensions

A continuació, es mostren alguns exemples d'arestes de pol aixamfranades per tal d'eliminar la saturació a les arestes. S'ha representat el camp magnètic B_y al pla $x = 0$.

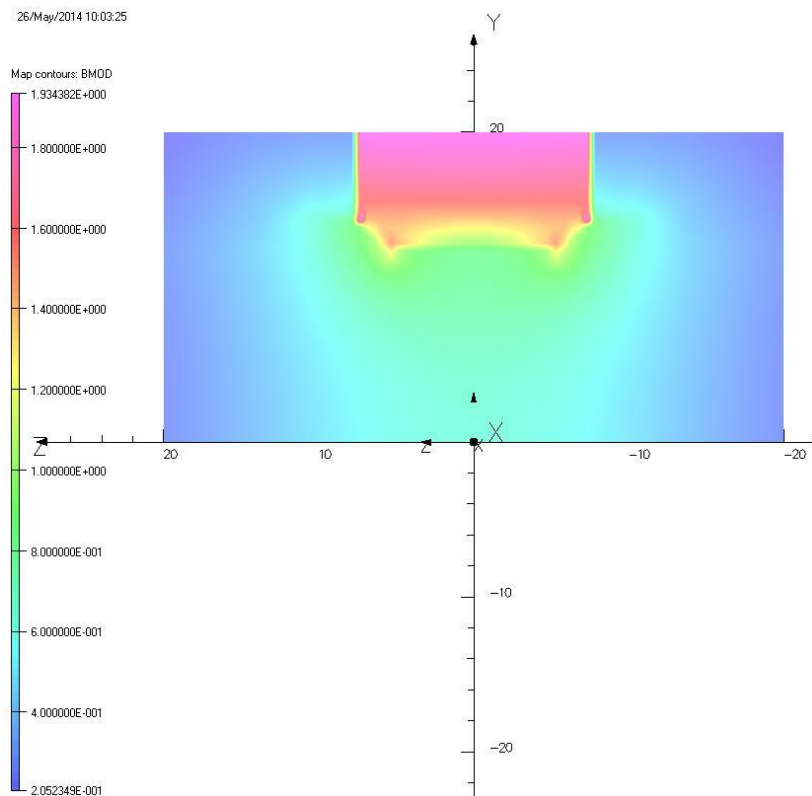


Figura E.2. Camp magnètic B_y en $x = 0$ per a l'extrem d'un pol amb un xamfrà de $b = 2$ mm i $\alpha = 45^\circ$

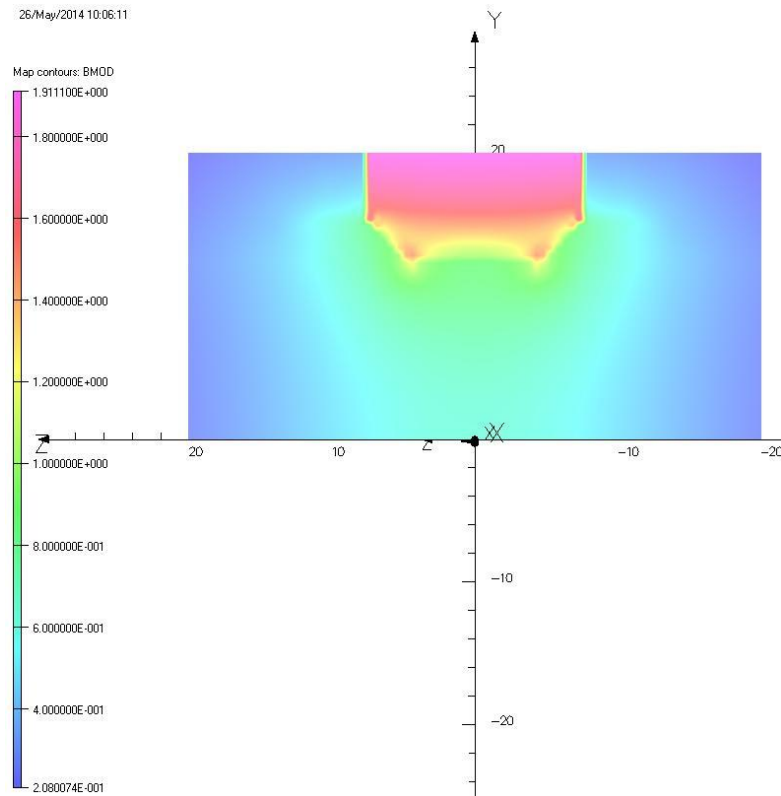


Figura E.3. Camp magnètic B_y en $x = 0$ per a l'extrem d'un pol amb un xamfrà de $b = 3$ mm i $\alpha = 45^\circ$

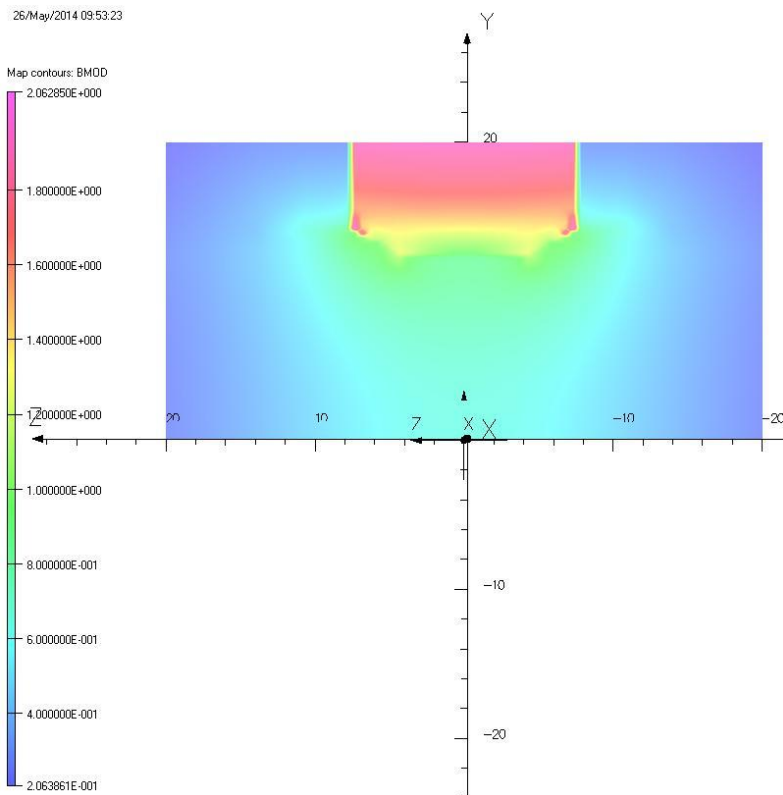


Figura E.4. Camp magnètic B_y en $z = 0$ per a l'extrem d'un pol amb un xamfrà de $b = 3$ mm i $\alpha = 30^\circ$

Annex F. Representacions de l'ondulator

Es mostren algunes imatges de la representació de l'ondulator amb el programa de CAD.

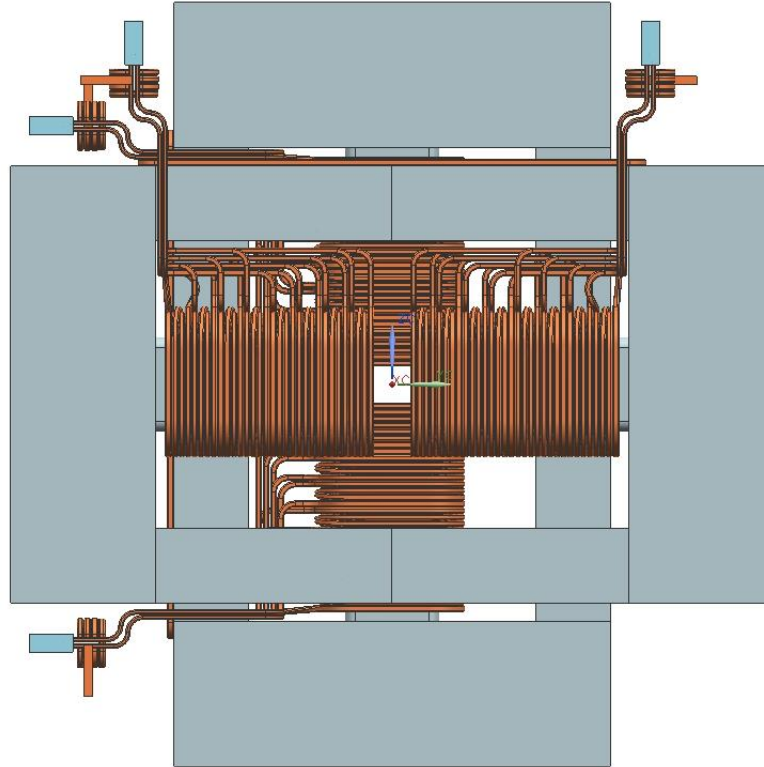


Figura F.1. Vista frontal de l'ondulator

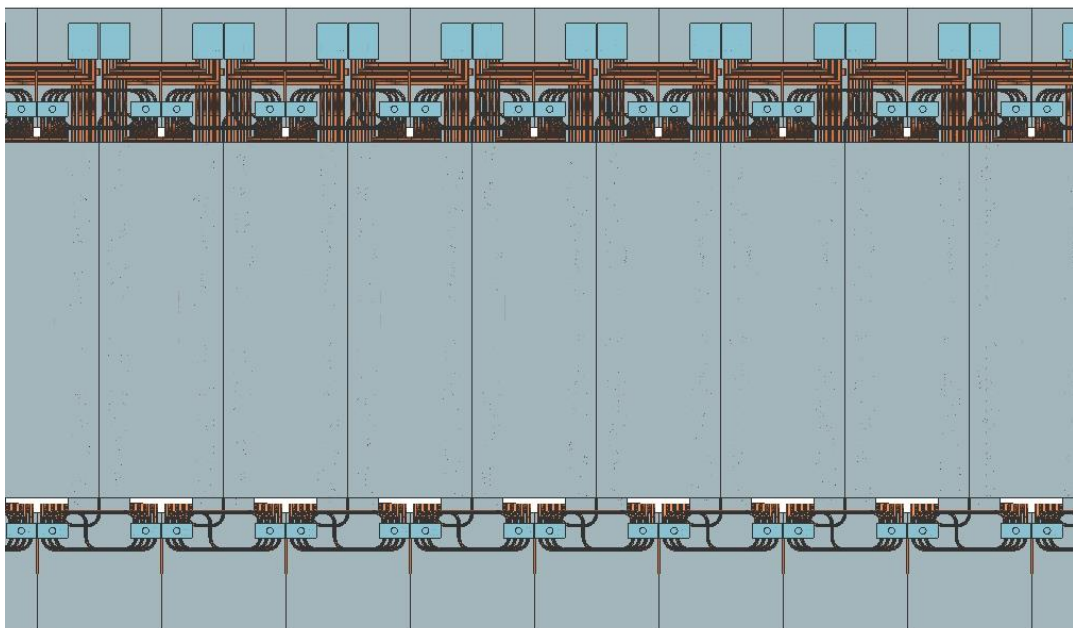


Figura F.2. Vista lateral d'una part de l'ondulator

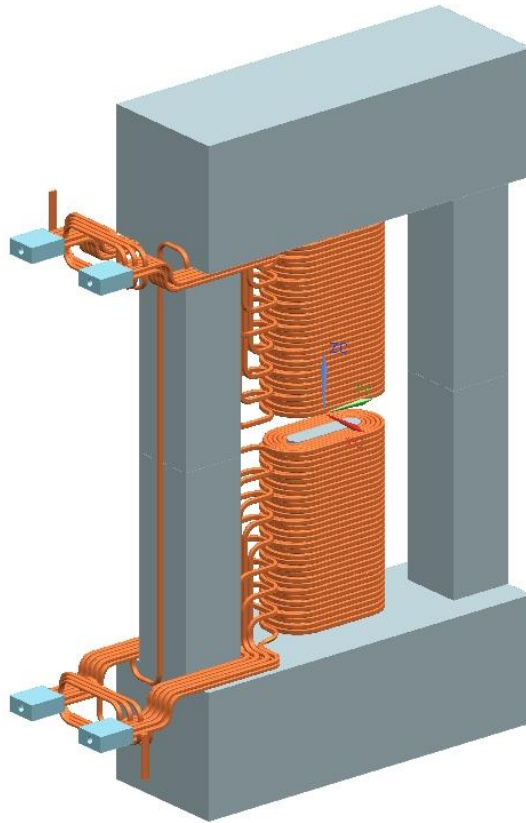


Figura F.3. Vista general d'una unitat

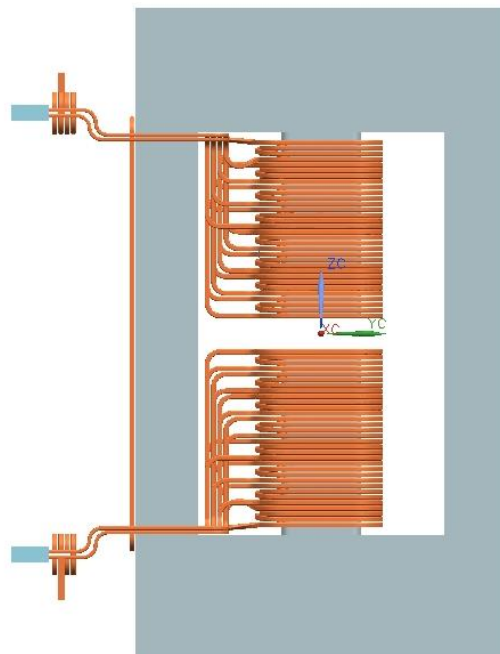


Figura F.4. Vista frontal d'una unitat

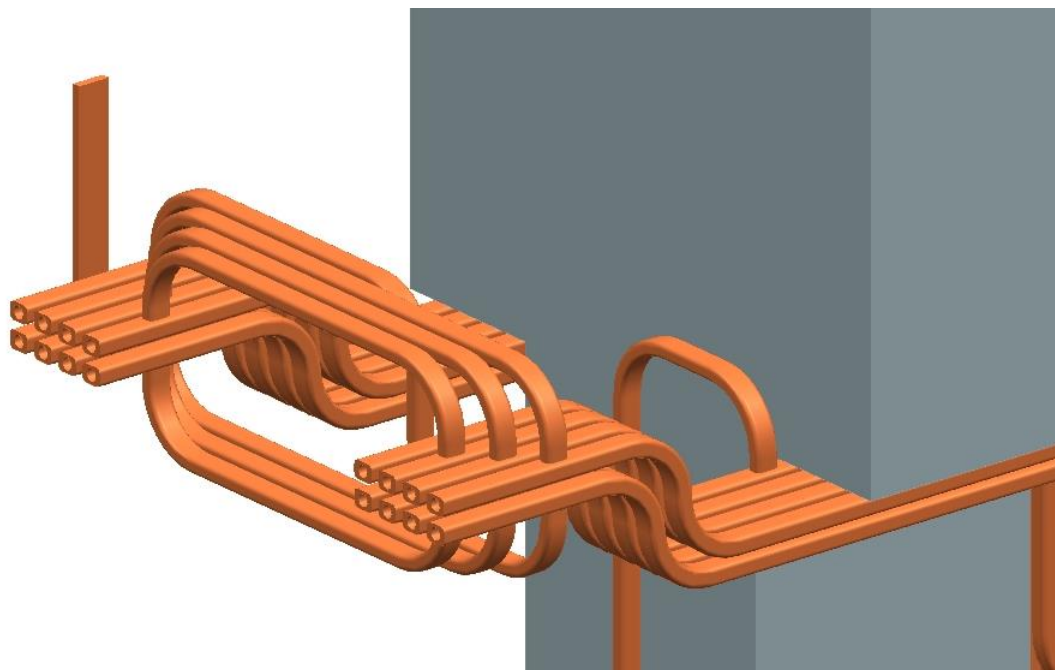


Figura F.5. Representació de les connexions elèctriques de la bobina