

Grau en enginyeria electrònica industrial i automàtica

**DISSENY D'UN PERMEÀMETRE PER AL LABORATORI  
DEL SINCROTRÓ ALBA**

Memòria

**JÚLIA LÓPEZ CLOSA**  
**PONENT: VIRGINIA ESPINOSA DURÓ**  
**DIRECTOR ADJUNT: VALENTÍ MASSANA GRÀCIA**  
PRIMAVERA 2021



# Agraïments

Vull donar les gràcies al Valentí per confiar-me aquest projecte i, sobretot, pel constant guiatge, orientació i supervisió, traduïts en moltes hores dedicades, que molt generosament m'ha proporcionat al llarg de tot el treball.

Vull agrair a la Virgínia tota l'ajuda brindada en la realització del treball, que és d'un valor inestimable. Gràcies, també, per animar-me i encoratjar-me en tota la seva durada, fins al final.

Als meus professors i als meus companys, en especial a la Rut i l'Eric, els uns per a la seva extraordinària dedicació a la transmissió del coneixement i als altres pel suport i l'amistat al llarg d'aquests 5 anys.

A la meva parella, l'Andreu, per la seva tendresa, calidesa i empatia infinites, que m'han omplert de força en aquesta última etapa.

I, finalment, als meus pares i a la meva germana, que m'han ajudat i recolzat incondicionalment en tot el meu recorregut acadèmic. Gràcies per comprendre'm, cuidar-me i fer-me costat sempre.



# Resum

En el present treball es realitza el disseny d'un permeàmetre per al laboratori de mesures magnètiques del sincrotró ALBA. A partir d'un estudi exhaustiu de l'estat de l'art dels permeàmetres es proposen dues configuracions del circuit magnètic, que posteriorment s'avaluen i es refinen de forma iterativa mitjançant l'anàlisi magnetoestàtic. Un ulterior estudi dinàmic, enfocat a identificar i a quantificar els casos en què el voltatge induït al secundari és limitant, permet establir les bases per al disseny de l'electrònica de tractament del senyal. Finalment es dimensionen els components del circuit secundari. El resultat és el disseny de dos models de permeàmetre, l'un asimètric i l'altre simètric, amb un rang de mesura adequat als tipus de materials que cal caracteritzar al laboratori.

# Resumen

En el presente trabajo se realiza el diseño de un permeámetro para el laboratorio de medidas magnéticas del sincrotrón ALBA. A partir de un estudio exhaustivo del estado del arte de los permeámetros se proponen dos configuraciones del circuito magnético, que posteriormente se evalúan y se refinan de forma iterativa mediante el análisis magnetostático. Un ulterior estudio dinámico, enfocado a identificar y a cuantificar los casos en que el voltaje inducido en el secundario es limitante, permite establecer las bases para el diseño de la electrónica de tratamiento de la señal. Finalmente se dimensionan los componentes del circuito secundario. El resultado es el diseño de dos modelos de permeámetro, uno asimétrico y otro simétrico, con un rango de medida adecuado a los tipos de materiales que se desean caracterizar en el laboratorio.

# Abstract

The present work holds the design of a permeameter for the laboratory of magnetic measurements of the ALBA synchrotron. As a result from an exhaustive study of the state of the art of permeameters, two configurations of the magnetic circuit are proposed and subsequently evaluated and refined iteratively by means of a magnetostatic analysis. A further dynamic study focused on identifying and quantifying the cases in which the voltage induced in the secondary is limiting allows to establish the bases for the design of the signal processing electronics. Finally, the components of the secondary circuit are designed. The result is the design of two different permeameters, one asymmetrical and the other symmetrical, with a measuring range appropriate to the types of materials to be characterized in the laboratory.



# Índex

Glossari de símbols	XIII
Glossari de termes	XV
Relació de lleis, normes i reglaments	XIX
<b>1 Objectius</b>	<b>1</b>
1.1 Propòsit . . . . .	1
1.2 Finalitat . . . . .	1
1.3 Objecte . . . . .	1
1.4 Abast . . . . .	2
1.5 Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecno- campus . . . . .	2
1.6 Perspectiva de gènere . . . . .	2
<b>2 Introducció</b>	<b>3</b>
2.1 Objecte . . . . .	3
2.2 Revisió d'antecedents . . . . .	4
2.3 Necessitats d'informació . . . . .	4
2.4 Abast . . . . .	5
<b>3 Objectius i especificacions tècniques</b>	<b>7</b>

<b>4</b>	<b>Marc conceptual</b>	<b>11</b>
4.1	Mesures magnètiques en corrent continu . . . . .	11
4.1.1	Introducció . . . . .	11
4.2	Descripció general d'un permeàmetre. Elements en comú . . . . .	15
4.2.1	Circuit magnètic del permeàmetre . . . . .	17
4.2.2	Mostra . . . . .	17
4.2.3	Nucli . . . . .	18
4.2.4	Bobina de magnetització . . . . .	19
4.2.5	Bobina secundària ( $B$ ) . . . . .	19
4.2.6	Mètodes de càlcul i mesura d' $H$ . . . . .	20
4.2.7	Bobines de compensació . . . . .	23
4.3	Problemes generals de mesura . . . . .	23
4.3.1	Pèrdues de flux . . . . .	24
4.3.2	Reluctància del <i>yoke</i> i de les juntures . . . . .	24
4.3.3	Pèrdues al circuit magnètic . . . . .	25
4.3.4	Compensació de la contribució del flux de l'aire . . . . .	29
4.3.5	Deformació mecànica . . . . .	30
4.3.6	Difusió . . . . .	31
4.4	Mesures en DC . . . . .	31
4.4.1	Mesura de corbes BH: mètodes . . . . .	32
4.5	Comparació dels models de permeàmetres existents . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>41</b>
5.1	Avaluació de totes les alternatives i eliminació de les menys adequades . . . . .	41
5.1.1	Elecció del mètode de mesura en CC . . . . .	46
5.1.2	Elecció de l'alternativa més adequada: primera aproximació de disseny . . . . .	46



5.1.3	Algorisme de disseny . . . . .	48
5.2	Anàlisi magnetoestàtic . . . . .	50
5.2.1	Introducció a Opera . . . . .	50
5.2.2	Procés de disseny iteratiu . . . . .	51
5.2.3	Hipòtesis inicials . . . . .	52
5.2.4	Corbes BH de materials d'ALBA . . . . .	53
5.2.5	Càlcul d'H teòric a partir del corrent de magnetització . . . . .	56
5.2.6	Primer grup d'experiments: model inicial del permeàmetre . . . . .	57
5.2.7	Segon grup d'experiments: permeàmetre asimètric . . . . .	60
5.2.8	Tercer grup: permeàmetre simètric . . . . .	67
5.2.9	Dimensionament de les bobines de magnetització . . . . .	70
5.3	Estudi del comportament dinàmic . . . . .	75
5.3.1	Casos d'estudi . . . . .	75
5.3.2	Procediment . . . . .	77
5.4	Dimensionament de la bobina B . . . . .	78
5.4.1	Consideracions de disseny . . . . .	78
5.4.2	Permeàmetre asimètric . . . . .	80
5.4.3	Permeàmetre simètric . . . . .	81
5.4.4	Espectre freqüencial del senyal B . . . . .	81
5.4.5	Dimensionament de les bobines H . . . . .	82
5.4.6	Permeàmetre asimètric . . . . .	83
5.4.7	Permeàmetre simètric . . . . .	84
5.5	Disseny del circuit secundari . . . . .	85
5.5.1	Procediment . . . . .	87
5.5.2	Senyal de la bobina B . . . . .	87
5.5.3	Senyal de la bobina H . . . . .	89

5.6	Consideracions finals . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Resultats</b>	<b>93</b>
6.1	Anàlisi magnetoestàtic . . . . .	93
6.1.1	Primer grup . . . . .	93
6.1.2	Segon grup: permeàmetre asimètric . . . . .	96
6.1.3	Tercer grup: permeàmetre simètric . . . . .	103
6.1.4	Dimensionament de les bobines de magnetització . . . . .	105
6.2	Anàlisi dinàmic . . . . .	107
6.2.1	Evolució dels corrents de Foucault i de B . . . . .	107
6.2.2	Model asimètric . . . . .	108
6.2.3	Model simètric . . . . .	110
6.3	Dimensionament de la bobina B . . . . .	112
6.3.1	Permeàmetre asimètric . . . . .	112
6.3.2	Permeàmetre simètric . . . . .	114
6.4	Dimensionament de la bobina H . . . . .	118
6.4.1	Permeàmetre asimètric . . . . .	118
6.4.2	Permeàmetre simètric . . . . .	118
6.4.3	Espectre freqüencial . . . . .	119
6.5	Disseny del circuit secundari . . . . .	119
6.5.1	Senyal de la bobina B . . . . .	119
6.5.2	Senyal de la bobina H . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Planificació</b>	<b>125</b>
7.1	Planificació inicial . . . . .	125
7.2	Execució . . . . .	130
7.3	Desviacions . . . . .	132

<b>8</b>	<b>Impacte mediambiental</b>	<b>135</b>
8.0.1	Relacionats amb matèries primeres . . . . .	135
8.0.2	Relacionats amb la vida útil i la generació de residus . . . . .	136
8.0.3	Relacionats amb la despesa d'energia . . . . .	136
8.0.4	Relacionats amb la salut . . . . .	136
<b>9</b>	<b>Conclusions</b>	<b>139</b>
9.1	Desviacions en el projecte . . . . .	140
9.2	Futures línies de treball . . . . .	141



# Índex de figures

4.1	Representació esquemàtica d'una anella ferromagnètica uniformement magnetitzada . . . . .	13
4.2	Circuit bàsic d'un permeàmetre segons l'ASTM. . . . .	16
4.3	Eixamplament del cicle d'histeresi conforme augmenta la freqüència de cicle	25
4.4	Corba normal de magnetització amb els punts descrits al document . . . . .	33
4.5	Obtenció de la corba de magnetització pel mètode dels steps . . . . .	34
4.6	Corba de magnetització i cicle d'histeresi complet amb els punts descrits al document. . . . .	36
5.1	Cronograma de l'algorisme de disseny . . . . .	49
5.2	Corbes de magnetització normals del Permendur i de l'ARMCO. . . . .	54
5.3	Corba de magnetització normal de l'M270-50. . . . .	55
5.4	Corba de magnetització normal de l'M1200-100. . . . .	56
5.5	Esquema del permeàmetre per a les primeres iteracions . . . . .	58
5.6	Esquema del permeàmetre asimètric laminat . . . . .	62
5.7	Bobines de magnetització al permeàmetre asimètric laminat . . . . .	63
5.8	Detall del mallat per al model de permeàmetre asimètric . . . . .	64
5.9	Model del permeàmetre simètric (bloc 2) . . . . .	69
5.10	Model del permeàmetre asimètric a Opera 2D . . . . .	77
5.11	Model de la bobina B al Simulink. . . . .	79

5.12	Integrador analògic. . . . .	86
5.13	Esquema electrònic del model que genera una <i>fem</i> de les mateixes característiques que la bobina B . . . . .	88
6.1	Comparació de la diferència percentual de flux entre el <i>yoke</i> i la mostra per les simulacions 4, 5 i 6 . . . . .	95
6.2	Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. M270-50. . .	99
6.3	Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. Permendur. .	99
6.4	Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. M1200-100. .	100
6.5	Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. ARMCO. . .	100
6.6	B al llarg de la mostra (M1200-100, $fmm = 6310$ Avolta) . . . . .	101
6.7	H al llarg de la mostra (M1200-100, $fmm = 6310$ Avolta) . . . . .	101
6.8	Variació d' $H$ en la direcció del gruix de la mostra (M100-100, $fmm = 6310$ Avolta). Bloc 2 del grup 2 de simulacions . . . . .	103
6.9	Variació d' $H$ en la direcció del gruix de la mostra (M100-100, $fmm = 6310$ Avolta). Bloc 2 del grup 3 de simulacions . . . . .	105
6.10	Funció $B(t)$ en forma del percentatge s'assoliment de $B_{m\grave{a}x}$ per a tres $B_{m\grave{a}x}$ diferents . . . . .	109
6.11	Estabilització de $B(t)$ per al permeàmetre asimètric i simètric amb valors molt similars de $B_{m\grave{a}x}$ . Permendur . . . . .	111
6.12	Forma de la funció $B(t)$ en forma del percentatge s'assoliment de $B_{m\grave{a}x}$ per a dos $B_{m\grave{a}x}$ diferents, segons si el permeàmetre és simètric o asimètric . . .	112
6.13	Evolució de la <i>fem</i> en el temps (permeàmetre asimètric, mètode dels steps)	113
6.14	Evolució de la <i>fem</i> en el temps (permeàmetre simètric, mètode dels steps)	114
6.15	Evolució de la <i>fem</i> en el temps per a camps baixos i mitjos (permeàmetre simètric, mètode del les inversions) . . . . .	116
6.16	Evolució de la <i>fem</i> en el temps per a camps alts (permeàmetre simètric, mètode del les inversions) . . . . .	116

6.17	Espectre freqüencial de la <i>fem</i> a la bobina B en un cas límit (mètode de les inversions) . . . . .	117
6.18	Espectre freqüencial de la <i>fem</i> a la bobina B en un cas límit (mètode dels steps) . . . . .	117
6.19	Espectre freqüencial de la <i>fem</i> a la bobina H en el cas més limitant . . . . .	119
6.20	Esquema electrònic de l'integrador del senyal de la bobina B . . . . .	120
6.21	Comparació de la <i>fem</i> i $V_o$ per a ambdós casos límit del senyal de B. . . . .	121
6.22	Esquema electrònic de l'integrador del senyal de la bobina H . . . . .	122
6.23	Visualització dels senyals <i>fem</i> i $V_o$ (mínims i màxims) a la bobina H . . . . .	123
7.1	Diagrama de Gantt de la planificació inicial. . . . .	129
7.2	Diagrama de Gantt de l'execució del projecte. . . . .	131





# Índex de taules

4.1	Taula de comparació dels diferents tipus de permeàmetre més rellevants . . .	39
4.2	Taula de comparació dels rangs d'operació de força magnètica dels permeàmetre més rellevants. . . . .	40
5.1	Enumeració dels objectius i avaluació de la seva prioritat . . . . .	42
5.2	Possibles solucions per a cada variable i els objectius que afavoreixen i que dificulten . . . . .	45
5.3	Efectes no desitjats detectats amb OPERA deguts a defectes de disseny . .	48
5.4	Característiques de les simulacions del grup 1. . . . .	59
5.5	Taula resum de les característiques de les simulacions del grup 2 . . . . .	64
5.6	Taula resum de les característiques de les simulacions del grup 3 . . . . .	69
5.7	Constants de temps de la funció $B(t)$ i variació de $B$ obtingudes a partir de les simulacions de l'apartat 6.2.2. Permeàmetre asimètric . . . . .	80
5.8	Constants de temps de la funció $B(t)$ i variació de $B$ obtingudes a partir de les simulacions de l'apartat 6.2.3. Permeàmetre simètric . . . . .	81
6.1	Taula resum dels resultats de les simulacions del primer grup. . . . .	94
6.2	Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 1 del segon grup. . .	97
6.3	Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 2 del segon grup. . .	97
6.4	Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 1 del tercer grup. . .	103
6.5	Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 2 del tercer grup. . .	104

6.6	Resultats del càlcul del nombre de voltes i superfícies de la bobina de magnetització per als permeàmetres asimètric i simètric . . . . .	106
6.7	Resultats del càlcul de la resistència, la variació de temperatura, els voltatges i les potències consumides de la bobina de magnetització per als permeàmetres asimètric i simètric . . . . .	107
6.8	Resultats de l'anàlisi dinàmic: constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre asimètric . . . . .	108
6.9	Resultats de l'anàlisi dinàmic: constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre simètric . . . . .	110
7.1	Tipus de tasques. . . . .	126
7.2	Numeració de les tasques de la planificació inicial, duració en dies i hores totals de cada una. . . . .	127
7.3	Numeració de les tasques de l'execució del projecte, duració en dies i hores totals de cada una. . . . .	130
7.4	Hores totals de la planificació inicial i de l'execució. . . . .	132
8.1	Taula d'accions impactants . . . . .	137
8.2	Taula de factors ambientals impactats . . . . .	138

## Glossari de símbols

$\vec{H}_C$	camp coercitiu	$A/m$	
$\tau$	constant de temps	s	
I	intensitat de corrent	A	
$\vec{J}$	densitat de corrent	$A/m^2$	
$\vec{B}$	densitat de flux magnètic	T	$kgA^{-1}s^{-2}$
$\vec{B}_R$	densitat de flux magnètic romanent	T	$kgA^{-1}s^{-2}$
$\phi_B$	flux magnètic	Wb	$m^2kgA^{-1}s^{-2}$
$fem$	força electromotriu	V	$m^2kgA^{-1}s^{-3}$
$fmm$	força magnetomotriu	Av	
$f$	freqüència	Hz	$s^{-1}$
$\vec{H}$	intensitat de flux magnètic	$A/m$	
$\vec{M}$	magnetització	$A/m$	
$\vec{M}_s$	magnetització de saturació	$A/m$	
$\vec{m}$	moment dipolar magnètic	$Am^2$	
$N_c$	nombre de capes		
$N_v$	nombre de voltes per capa		
$p$	packing factor		
$\mu$	permeabilitat magnètica	$H/m$	$kgmA^{-2}s^{-2}$
$\mu_0$	permeabilitat del buit		
$\mu_r$	permeabilitat relativa		
$\mathfrak{R}$	reluctància magnètica		$kg^{-1}m^{-2}A^2s^2$
$R$	resistència elèctrica	$\Omega$	$m^2kgA^{-2}s^{-3}$
SR	<i>slew rate</i>		
$\chi$	susceptibilitat magnètica		
V	voltatge	V	$m^2kgs^{-3}A^{-1}$



# Glossari de termes

Bobina B	Bobina inductiva que envolta la mostra i és utilitzada per determinar la densitat de flux magnètic $B$ a partir del senyal integrat de la $fem$ induïda.
Bobina de magnetització	Bobina emprada per magnetitzar el circuit magnètic del permeàmetre.
Bobina H	Bobina inductiva utilitzada per determinar la intensitat de camp $H$ a partir del senyal integrat de la $fem$ i del valor de la permeabilitat en el buit.
Circuit magnètic	Conjunt d'elements per on circula en forma de camí tancat el flux magnètic.
Circuit secundari	Circuit format per una bobina inductiva, com la bobina B o la bobina H, i l'electrònica per obtenir la $fem$ integrada.
Mètode quasi-estàtic	Mètode de mesura de la permeabilitat que es basa en fer variar el camp magnètic a freqüències molt baixes per reduir els efectes dels corrents de Foucault.
Corba d'histèresi magnètica	Corba que descriu la dependència de B amb H en els materials ferromagnètics.
Corba de magnetització normal	Corba que descriu la dependència de B amb H en la magnetització d'un material partint del seu estat desmagnetitzat.

Corrents de Foucault	Corrents induïts en un material sotmès a un camp magnètic variable.
Densitat de flux magnètic	Magnitud física que representa el camp magnètic real generat per càrregues elèctriques en moviment.
Difusió magnètica	Fenomen físic que descriu el retard en la magnetització completa d'un material quan s'aplica un canvi en la intensitat de camp H.
Ferromagnetisme	Propietat d'alguns materials d'alinear tots els seus dominis magnètics en la direcció i sentit d'un camp extern aplicat.
Flux magnètic	La densitat de flux magnètic que travessa una àrea determinada
Força electromotriu	Voltatge induït en una bobina secundària quan aquesta està sotmesa a un camp magnètic variable.
Força magnetomotriu	El producte del corrent aplicat a una bobina pel nombre de voltes de la bobina.
Inducció magnètica	Fenòmen físic en què camps magnètics variables generen camps elèctrics.
Intensitat de camp	El camp magnètic associat al moviment de càrregues lliures, com les que circulen per una bobina.
Magnetització	El camp magnètic associat al moviment de càrregues lligades, com el cas d'àtoms dins d'un material.
Material ferromagnètic tou	Material amb contingut de ferro molt fàcilment magnetitzable.

Mètode ballístic	Mètode quasi-estàtic per determinar la corba d'histèresi d'un material mitjançant un permeàmetre, consistent a fer variacions o inversions del corrent de magnetització en forma d'esglaió per induir una <i>fem</i> a les bobines d'inducció.
Permeabilitat magnètica	Paràmetre que descriu la capacitat d'un material a ser magnetitzat.
Permeàmetre	Dispositiu per determinar la permeabilitat magnètica d'un material mitjançant un circuit magnètic tancat en condicions quasi-estàtiques.
Reluctància magnètica	Resistència d'un material o circuit magnètic a deixar passar el flux magnètic. És l'equivalent magnètic a la resistència elèctrica.





# Relació de lleis, normes i reglaments

## Normativa

REIAL DECRET 299/2016, de 22 de Juliol, sobre la protecció de la salut i la seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb l'exposició a camps electromagnètics.

REIAL DECRET 299/2016, de 2 d'Agost, pel que s'aprova el Reglament electrotècnic per a baixa tensió.

## Estàndards

UNE-EN 60404-4:1999 Materials magnètics. Part 4: Mètodes de mesura en corrent continu de les propietats magnètiques del ferro i del silici.

UNE-EN 60404-6:2004 Materials magnètics. Part 6: Mètodes de mesura de les propietats magnètiques dels materials metàl·lics i dels materials en pols en pols magnèticament tous a freqüències compreses entre 20 i 200 Hz, sobre mostres amb forma d'anella.

UNE-EN 60404-8-6:2017 Materials magnètics. Part 8-6: Especificacions per a materials particulars. Materials metàl·lics magnèticament tous.

UNE-EN 60529:2018 Graus de protecció proporcionats per les envolupants (Codi IP).



# Capítol 1

## Objectius

### 1.1 Propòsit

Dissenyar de forma teòrica tant el circuit magnètic com els circuits primaris i secundaris d'un permeàmetre destinat a traçar corbes normals de magnetització i cicles d'histèresi de materials ferromagnètics tous.

### 1.2 Finalitat

Arribar de forma teòrica i mitjançant l'ús de programes de simulació d'elements finits a un disseny factible de permeàmetre adaptat per ser utilitzat en el laboratori de mesures magnètiques d'ALBA, on en fases posteriors al projecte serà construït, provat i modificat en base als resultats experimentals. El permeàmetre ha de poder mesurar els valors de  $B$  i  $H$ , i per tant la permeabilitat, en un seguit de punts de les corbes de magnetització normals i cicles d'histèresi de materials ferromagnètics tous en CC.

### 1.3 Objecte

Disseny teòric del circuit magnètic, del circuit d'alimentació i del secundari d'un permeàmetre destinat a traçar corbes normals de magnetització i corbes d'histèresi completes de materials ferromagnètics tous en CC, emplaçat al laboratori de mesures magnètiques d'ALBA.

## 1.4 Abast

Es realitzen experiments simulats per al dimensionament del circuit magnètic del permeàmetre, alhora que es desenvolupen i dissenyen el circuit primari, format per les bobines de magnetització, i l'electrònica destinada a recollir el senyal a les bobines secundàries. Es faciliten aquests tres dissenys (no s'inclouen plànols) juntament amb un seguit d'indicacions i consideracions de cara a l'experimentació amb el permeàmetre físic.

## 1.5 Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus

Aquest projecte s'engloba en un context de col·laboració entre el grup de recerca FI4.0 (Fabricació Intel·ligent i Innovació Industrial) del Tecnocampus i el sincrotró ALBA. L'alumna ha treballat els següents aspectes:

- Disseny del circuit magnètic, que engloba matèria dels àmbits de la física del magnetisme i d'electrotècnia.
- Simulació del comportament magnètic del permeàmetre amb programes FEM, en l'àmbit de la física del magnetisme i de l'enginyeria industrial.
- Disseny del tractament del senyal, en l'àmbit de la instrumentació electrònica.
- Disseny del circuit primari, en l'àmbit de l'electrotècnia.
- Estudi de la viabilitat tècnica i mediambiental del projecte, en l'àmbit de l'enginyeria industrial.

## 1.6 Perspectiva de gènere

La perspectiva de gènere no s'aplica en aquest treball perquè el seu resultat no és un producte comercial, un servei tecnològic o un procés de producció. El dispositiu dissenyat equival a una solució tècnica concreta que respon a un seguit de necessitats internes d'ALBA. Per aquest motiu és correcte considerar el producte final del projecte com un prototipus destinat a la recerca científica amb una aplicació única i exclusiva en el context descrit.

# Capítol 2

## Introducció

### 2.1 Objecte

L'objecte del projecte està estretament lligat amb la feina del laboratori de mesures magnètiques del sincrotró ALBA. Una de les moltes activitats que s'hi realitzen és la mesura dels camps magnètics dels diferents prototips dissenyats o fabricats per empreses i institucions relacionades amb els acceleradors de partícules, així com d'altres d'empreses privades que acudeixen a ALBA per a validar el disseny i els requisits dels seus dispositius.

En el camp dels materials, l'acer i el ferro han estat àmpliament utilitzats per a aplicacions magnètiques des de fa molt temps, generalment per a instruments relacionats amb l'electricitat (transformadors de corrent, electroimants, etc.). Un camp d'aplicació més recent són els acceleradors de partícules, en què l'acer es fa servir per a fabricar cambres de buit o per a millorar els camps magnètics en les matrius magnètiques utilitzades per als dispositius d'inserció. Aquesta aplicació requereix un alt grau de precisió en la determinació de l'anomenada permeabilitat magnètica, un paràmetre relacionat amb el camp magnètic induït en els materials en funció del camp magnètic extern aplicat.

Els fabricants que subministren el ferro i l'acer a les institucions científiques proporcionen habitualment la caracterització magnètica del metall per a cada tipus de metall requerit. No obstant això, tenint en compte que l'aplicació d'aquests materials en l'àmbit d'un sincrotró demana unes mesures magnètiques molt precises, és convenient disposar de la possibilitat de realitzar una verificació creuada a ALBA per tal de ratificar les dades facilitades pel proveïdor.

A més d'aquest marc, el laboratori també dona suport a les diferents línies de llum tot dissenyant i simulant diversos dispositius i fent costat a l'accelerador en tot allò relacionat amb el mesurament magnètic. En aquest context, una de les necessitats del laboratori és un dispositiu per a mesurar la permeabilitat magnètica dels materials ferromagnètics; és a dir, ha de poder traçar la corba de magnetització i la corba d'histèresi (que són les que permeten determinar la permeabilitat i per tant el comportament magnètic) dels materials que més es fan i es faran servir a ALBA en els propers anys. Per les característiques del problema, el dispositiu idoni per a aquest propòsit s'anomena permeàmetre i permet caracteritzar mostres de cert gruix.

Es dona el cas que els materials que es volen caracteritzar comparteixen la característica de magnetitzar-se ràpidament quan es troben sotmesos a un camp magnètic extern. Als que presenten tan poca resistència a la magnetització i a la desmagnetització se'ls anomena materials ferromagnètics tous i tenen permeabilitats magnètiques molt elevades en la zona lineal de la corba BH.

## 2.2 Revisió d'antecedents

Per desenvolupar aquest treball ha estat necessari un estudi detallat de l'estat de l'art dels dispositius de mesura de corbes d'histèresi en CC, pel qual ha calgut accedir a un gran volum d'informació de moltes fonts diferents.

## 2.3 Necessitats d'informació

Aquest projecte conté un volum de recerca i de plantejament teòric molt important en els àmbits de la física de l'electromagnetisme i més en segon terme de l'electrònica. Això es tradueix en una gran quantitat de fonts d'informació de diferents tipus, que donen suport a aquesta part teòrica en tots els àmbits. A més de la normativa, s'han consultat documents com:

- Llibres acadèmics
- Articles científics, en especial aquells relatius a permeàmetres
- Projectes de fi de màster
- Apunts oficials de graus universitaris

- Altres documents especialitzats, com ara circulars de l'Institut Nacional d'Estàndards i Tecnologia

La major part de la informació a què s'ha tingut accés és de principis i mitjans del segle passat. Aquest fet es deu principalment a dos motius: és l'única informació que s'ha fet pública i va ser precisament en aquella època que hi ha haver més investigació i invenció en mesures magnètiques amb permeàmetres. No obstant això, també es descriu breument el mode d'operació d'alguns models més nous, el disseny dels quals es manté sota secret industrial.

Per altra banda, els llibres acadèmics s'han usat principalment com a introducció als permeàmetres i com a documentació de suport per a comprendre la teoria de l'electromagnetisme i realitzar els càlculs pertinents.

## 2.4 Abast

El projecte inclou:

- Una introducció al magnetisme i als conceptes necessaris per comprendre i desenvolupar el treball.
- L'estudi, acotat a materials homogenis i isòtrops, de la viabilitat tècnica, econòmica i mediambiental del permeàmetre dissenyat.
- Un anàlisi teòric de la viabilitat tècnica del permeàmetre.
- El disseny del permeàmetre a partir d'un estudi del seu comportament en condicions magnetostàtiques (Opera 3D).
- El disseny del permeàmetre a partir d'un estudi del seu comportament en condicions dinàmiques (Opera 2D).
- El disseny i dimensionament del circuit d'alimentació del permeàmetre, format per les fonts d'alimentació i les bobines de magnetització.
- El disseny i dimensionament del circuit secundari del permeàmetre, que inclou:
  - La bobina secundària B.
  - El dispositiu de mesura d'H.
  - Els dispositius de recollida, amplificació i integració dels senyals de B i H.

- Una guia d'ús del permeàmetre dissenyat amb un conjunt d'indicacions de cara a la futura implementació del permeàmetre.

El projecte NO inclou:

- El disseny i els plànols dels elements mecànics que formen el dispositiu.
- L'estudi del comportament magnètic del permeàmetre quan els seus elements es troben sotmesos a l'efecte de tensions mecàniques.
- Els estudis pertinents a les fases de construcció i de posada en marxa del dispositiu.
- La verificació experimental del disseny teòric.
- Els estudis físics i proves experimentals necessàries per a la verificació de l'adequació del permeàmetre als estàndards.



## Capítol 3

# Objectius i especificacions tècniques

L'objectiu final d'aquest projecte és el disseny detallat (tant pel que fa a la part magnètica com la part electrònica) d'un permeàmetre per a mesurar les propietats magnètiques de mostres de materials ferromagnètics tous destinat a formar part del laboratori de mesures magnètiques del sincrotró ALBA. El permeàmetre ha de poder traçar la corba d'histeresi d'aquests materials amb la precisió i fiabilitat dels models existents.

A continuació es llisten els objectius amb les seves respectives especificacions tècniques.

1. El permeàmetre ha de permetre mesurar mostres rectangulars d'una llargada d'uns 20-25 cm i d'uns 3-6 mm de gruix.
  - Mides del circuit magnètic adequades a aquestes dimensions.
  - Tipus de permeàmetre adequat a la geometria rectangular.
2. El permeàmetre ha de poder treballar amb mostres de materials ferromagnètics tous.
  - Estudi de la viabilitat tècnica del permeàmetre enfocada a l'aplicació de forces magnetomotrius de magnituds petites/mitjanes.
  - Estudi magnetoestàtic orientat a obtenir un rang ampli de forces magnetomotrius per a diferents materials ferromagnètics.
  - Dimensionament del circuit magnètic i del primari d'acord amb el comportament magnètic de materials dels quals se'n coneixen les característiques (Permendur, ARMCO, M270-50, M1200-100).

3. Aconseguir que el permeàmetre sigui capaç de mesurar amb precisió la densitat de flux del camp magnètic i el camp aplicat.
  - Ús d'un mètode de mesura d' $H$  alternatiu al càlcul a través del corrent.
  - Obtenció de les corbes BH amb el mètode balístic.
  - Elements del circuit magnètic disposats de manera que afavoreixin la uniformitat de flux.
  - Bon contacte entre el *yoke* i la mostra facilitat per la geometria del circuit magnètic.
  - Estudi dinàmic orientat a reduir al màxim els efectes dels corrents de Foucault en les mesures.
  - *Yoke* laminat.
4. Facilitar l'execució simple, ràpida i efectiva del procés de mesura amb el permeàmetre dissenyat.
  - Preferència per un circuit magnètic que faciliti la fixació de la mostra al permeàmetre.
  - Obtenció de les corbes BH amb el mètode balístic.
  - Automatització de la presa de mesures amb el mètode balístic.
5. Afavorir la simplicitat de la mecànica i l'electrònica del disseny.
  - Obtenció de les corbes BH amb el mètode balístic.
  - Es descarta l'ús de bobinat de compensació.
  - Es descarta l'ús de bobines  $H$  rotatòries.
6. Aportar un disseny compacte i resistent i que s'adapti bé a les condicions de treball del laboratori. No es treballa sota requeriments industrials.
  - Circuit magnètic amb el menor nombre d'elements possible.
  - Obtenció de les corbes BH amb el mètode balístic.
7. Dissenyar el circuit secundari de manera que sigui compatible amb la instrumentació del laboratori (fonts de tensió i de corrent, sensors, etc.). Es busca aprofitar els recursos de què ja es disposa.

- Dues fonts de corrent bipolar programables FAST-PS 3020-600 de CAENels.
- Obtenció de dades amb l'equipament del laboratori (oscil·loscopis i PCs).
- Obtenció de la resta de materials per fabricar i operar el permeàmetre a través dels proveïdors habituals d'ALBA.

8. Reduir el sobrecost del permeàmetre

- Afavoriment de la simplicitat en el disseny per sobre de funcionalitats innecessàries en el context privat en què es farà servir el permeàmetre.



# Capítol 4

## Marc conceptual

Aquest capítol està dedicat a fer una breu descripció, orientada a explicar la teoria bàsica del projecte, del marc teòric dels permeàmetres i de l'aplicació dels conceptes bàsics del magnetisme en aquest tipus de dispositiu. Amb aquest propòsit es pretenen establir els fonaments necessaris per tal de disposar de prou reconeixement per emprendre la tasca de dissenyar el permeàmetre.

Al capítol 1 del document d'annexos es fa una revisió de la teoria bàsica de l'electromagnetisme, que s'aconsella consultar prèviament a la lectura d'aquest document.

### 4.1 Mesures magnètiques en corrent continu

#### 4.1.1 Introducció

Un dels mètodes de mesura magnètica més poc conegut és el que fa referència a uns dispositius per determinar la permeabilitat magnètica dels materials i, en conseqüència, la capacitat de poder traçar el seu cicle d'histèresi. D'aquesta manera és possible preveure com es comportarà un material sotmès als efectes de l'electromagnetisme, cosa molt útil i sovint necessària quan es treballa en entorns en què es generen camps magnètics.

Existeixen diversos mètodes per trobar el cicle d'histèresi per a diferents geometries d'un material ferromagnètic (anelles, barres cilíndriques o rectangulars, làmines, etc.), i tots, fins els més ben optimitzats i ben dissenyats, tenen en comú el fet que presenten diversos problemes en la precisió de les mesures<sup>1</sup>. Això es deu a molts fenòmens directament

---

<sup>1</sup>Més endavant es comprovarà que és cert que algunes geometries proporcionen millors resultats que d'altres, però tot i així la gran dificultat fer mesures magnètiques sempre hi és present.

relacionats amb el magnetisme que es tracten en els propers capítols.

Durant principis del segle XX, un cert nombre d'enginyers i físics (entre els quals es trobaven Ewing, Fahy, Burrows o Niwa) van proposar els primers dissenys de permeàmetre que resolien parcialment el problema de rigor de les mesures magnètiques en barres de longitud relativament petita.

Aleshores partien del coneixement que la millor manera de determinar la corba d'histeresi d'un material és fer que la mostra tingui forma d'anella de secció quadrada o circular i un gruix petit comparat amb el seu diàmetre, de tal manera que es pot considerar que  $B$  i  $H$  són constants en qualsevol secció transversal de l'anella. Amb aquesta geometria, la totalitat del circuit magnètic la forma la mostra de material, també anomenat nucli. Es parla llavors de *circuit magnètic tancat* [1]. Els circuits magnètics tancats tenen a més l'avantatge que durant la seva magnetització no es produeixen *pols magnètics*<sup>2</sup>, ja que no hi ha extrems, i per tant no es creen camps magnètics deguts al propi material oposats al camp aplicat que puguin comprometre el rigor de les mesures preses. Aquest fenomen s'anomena *desmagnetització pròpia* i té efectes importants sobre els circuits magnètics quan són *oberts* [2].

Així, és possible calcular la intensitat de camp  $H$  a partir del corrent  $I$  que circula per una *bobina de magnetització* de  $N$  voltes segons la següent equació:

$$H = \frac{NI}{l_m} \quad (4.1)$$

On  $l_m$  és la longitud del camí magnètic, que no coincideix ben bé amb la circumferència mitja. Es pot calcular de la següent manera:

$$l_m = \frac{\pi}{2}(D_i + D_o) \quad (4.2)$$

On  $D_i$  és el diàmetre interior de l'anella i  $D_o$  el diàmetre exterior. Aquesta expressió només es pot fer servir quan  $D_o/D_i \leq 1.1$  [3].

La bobina de magnetització pot tenir diverses capes i ha d'envoltar la totalitat del circuit magnètic de manera uniforme perquè el material es magnetitzi també uniformement i es pugui aplicar l'equació (4.2). D'aquesta manera, l'única magnitud magnètica mesurada és  $B$ , ja que per trobar  $H$  sols és necessari conèixer el corrent, que es pot trobar fàcilment amb l'ajut d'un amperímetre, i la resta són paràmetres ja coneguts del circuit. Una *bobina*

---

<sup>2</sup>Això no és ben bé acurat. Depenent de la geometria en poden arribar a aparèixer, però tindran molta menys presència que en mostres obertes.

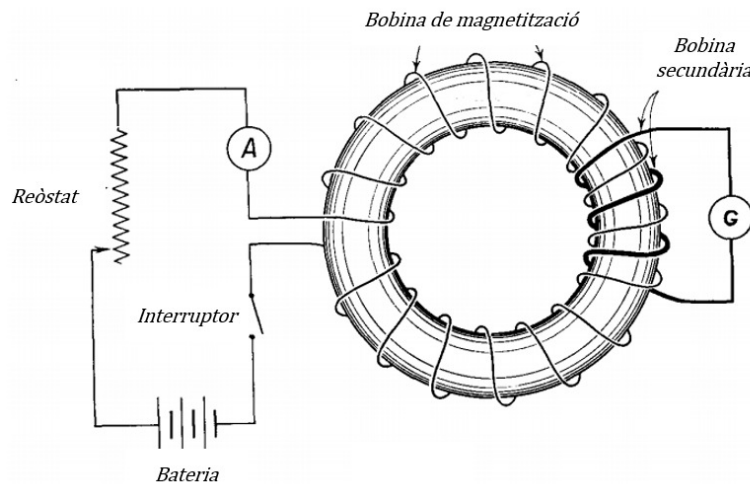


Figura 4.1: Representació esquemàtica d'una anella ferromagnètica uniformement magnetitzada. El bobinat secundari està connectat a un galvanòmetre balístic. Extret de: [4]

secundària (sovint anomenada *search coil* o *B-coil* en anglès) es connecta a un integrador electrònic o, en muntatges més antics, a un galvanòmetre balístic, i proporciona el valor de la densitat de flux magnètic  $B$  per a un camp aplicat  $H$  en concret<sup>3</sup>. La bobina que mesura  $B$  pot o no estar enrotllada al voltant de tota l'anella: si se sap que el material és homogeni no és necessari, perquè llavors la magnitud i la direcció de  $B$  és la mateixa a tot arreu del nucli. Normalment se sol optar per fer-ho, ja que en general es desconeix si el material compleix amb aquesta condició.

Malgrat tot, existeixen dos motius pels quals no es pot considerar un muntatge ideal. Primer de tot, el camp magnètic no és ben bé uniforme en la secció de l'anella, ja que a causa de com està bobinat (hi ha més concentració d'espines a la part interna, i en canvi a l'externa es troben més separades), adquireix valors més grans com més a prop del centre es trobi el punt. Si la relació entre el radi extern i el radi intern és més gran que 1.6, la no-uniformitat d' $H$  és massa significativa per obtenir resultats fiables<sup>4</sup> [3].

La figura (4.1) mostra un muntatge elèctric senzill per a mesurar la permeabilitat d'un toroide, si aquest es troba desmagnetitzat en el moment d'iniciar el test. El reòstat serveix per canviar la magnitud del corrent que circula per la bobina de magnetització. La bobina secundària és l'encarregada de mesurar la densitat de flux magnètic i va connectada a

<sup>3</sup>Més endavant en el capítol es parla dels circuits elèctrics per a l'alimentació de la bobina de magnetització i l'adquisició de dades amb la bobina secundària

<sup>4</sup>Existeix un mètode basat en mètodes d'interpolació numèrics proposat per Nakata [5], que es pot aplicar fins a relacions entre radis més petites que 3

un galvanòmetre balístic, un dels instruments més usats tradicionalment per a realitzar mesures magnètiques. Aquest circuit elèctric és molt senzill i no permet mesurar corbes BH: són més freqüents muntatges amb elements com interruptors inversors i bobines de calibratge. Actualment, la bateria se sol substituir per una font d'alimentació bipolar, que permet prescindir de l'interruptor inversor per a traçar corbes BH.

Pels motius mencionats anteriorment, les mostres en forma d'anella són molt convenients a l'hora de realitzar mesures magnètiques precises. Només existeix la *reluctància* del material al circuit, les *pèrdues de flux* són negligibles i tampoc hi ha efectes de desmagnetització pròpia<sup>5</sup>. És possible magnetitzar el circuit amb una sola bobina i calcular  $H$  a partir del corrent que hi circula.

No obstant això, els desavantatges de treballar amb aquesta geometria són molt importants. Per començar, és molt difícil mecanitzar peces perquè tinguin forma d'anella. És molt més fàcil i ràpid produir mostres en forma de barra. No és possible tampoc transformar una barra en una anella, ja que si es dobleja i s'ajunten els seus extrems hi haurà un entreferro considerable entre ells. Si se solden, aquest fragment seguirà sense tenir la mateixa reluctància que la resta del material i el seu estat magnètic serà diferent. Això es traduirà en errors força grans als resultats [6]. A més a més, el procés de bobinar l'anella uniformement és tediós i requereix de molt de temps; més tenint en compte que s'ha de dur a terme per cada nova mostra. Un altre problema que presenten, tot i que per al cas estudiat no és determinant, és que el material magnètic que forma l'anella ha de ser molt tou perquè la força magnètica disponible de la bobina de magnetització el pugui magnetitzar. En formar la totalitat del circuit magnètic, si es volen mesurar les propietats d'una anella de material ferromagnètic dur<sup>6</sup>, és possible que no es pugui arribar als valors més grans (o més negatius) del cicle d'histeresi per manca d' $H$ . Un altre desavantatge de fer servir aquests circuits és que generalment la mostra, un cop mesurades les seves propietats, es vol fer servir per a alguna aplicació. Les anelles no tenen tant ús com altres geometries, i no convé manipular-ne la forma per a fer-la indicada per a una aplicació en concret (pels efectes de la deformació mecànica sobre les propietats magnètiques d'un material, com es veurà més endavant). Així doncs, és per tots aquests motius descrits que l'opció de dissenyar un dispositiu que es basi en el principi del toroide com a circuit tancat es descarta des del primer moment en aquest projecte.

---

<sup>5</sup>En aquest mateix apartat es tracten amb més detall els primers fenòmens, la presència dels quals és indesitjable quan es realitzen mesures magnètiques.

<sup>6</sup>Són aquells materials ferromagnètics que tenen un camp coercitiu gran i una permeabilitat baixa, per la qual cosa per magnetitzar-los és necessària l'aplicació de valors d' $H$  grans.



Apareix, doncs, la necessitat d'uns dispositius que permetin mesurar la permeabilitat magnètica i traçar la corba d'histeresi per mostres en forma de barra. Però en un circuit magnètic obert els efectes de la desmagnetització pròpia són molt grans i incideixen molt negativament en els resultats<sup>7</sup>. A més a més, el camí de retorn del flux magnètic és l'aire, la reluctància del qual és molt alta. Els permeàmetres resolen aquests problemes tancant el circuit magnètic amb la mostra amb l'ajuda d'un o més *yokes* (nuclis ferromagnètics) d'un material tou de baixa reluctància. Aquests *yokes* actuen com a camí de retorn per al flux magnètic<sup>8</sup>. Amb un disseny mecànic que asseguri un molt bon contacte entre totes les parts del circuit magnètic, es pot assumir que la força magnetomètrica (*fmm*) total aplicada es destina a magnetitzar la mostra [1]. La reluctància dels *yokes* s'ha de tenir en consideració, i més endavant es tracten diferents maneres de corregir-la. Els dispositius resultants són els anomenats *permeàmetres*.

A continuació s'introdueixen els elements d'un permeàmetre (amb alguns exemples), es discuteixen després els problemes que tenen una incidència significativa en el disseny d'aquests dispositius i en la presa de mesures i finalment es descriuen les propostes de cada un dels tipus per a reduir-ne els efectes que puguin tenir.

## 4.2 Descripció general d'un permeàmetre. Elements en comú

L'ASTM International (acrònim d'American Society for Testing and Materials) posa com a esquema bàsic de permeàmetre al seu estàndard ASTM A341 el que es mostra a la figura (4.2). L'esquema és molt útil per entendre conceptualment el funcionament d'aquests dispositius, si bé cada tipus de permeàmetre presenta variacions significatives. Primer de tot, cal fer èmfasi en el fet que no es tracta d'una representació absoluta d'un permeàmetre ni d'un circuit de traçat de la corba d'histeresi. Aquest esquema es basa en el mètode balístic de mesura de  $B$  i  $H$ , que utilitza una font d'alimentació CC per a subministrar un corrent constant, la magnitud i sentit dels quals es regulen en el circuit mitjançant resistències variables i interruptors inversors. L'assaig balístic s'ha fet servir tradicionalment amb el mètode de les inversions perquè proporciona resultats molt fiables, i encara ara és una pràctica comuna de molts laboratoris; però no és l'única manera d'obtenir la

---

<sup>7</sup>Poden existir casos en què, per restriccions experimentals, sigui estrictament necessari treballar amb mostres en circuit obert. Existeixen dispositius que permeten fer-ho amb resultats força acurats, com és el cas del proposat per H. Aspden [7].

<sup>8</sup>En realitat, per als permeàmetres de tipus B o no compensats, com s'explica més endavant, aquesta afirmació no és ben bé certa: es magnetitza el *yoke* i el que actua com a camí de retorn és la mostra.

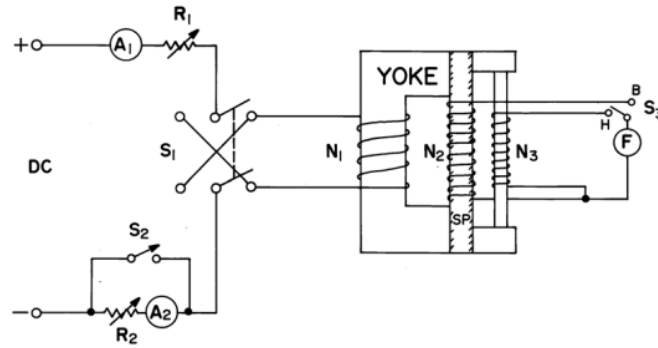


Figura 4.2: *Circuit bàsic d'un permeàmetre segons l'ASTM.*

corba d'histèresi d'un material.

L'esquema és força semblant al que s'ha discutit anteriorment per a una anella de material ferromagnètic. El circuit de magnetització podria substituir-se per una font bipolar i una resistència shunt. A la figura s'ha optat per treballar amb una font de corrent constant i per introduir les resistències  $R_1$ ,  $R_2$  i els interruptors  $S_1$  i  $S_2$ , que controlen la magnitud i el sentit del corrent de magnetització.  $S_1$  és un interruptor inversor, i  $S_2$  es tanca per a reduir el valor del corrent sense invertir-lo. Ambdues operacions són necessàries per a reproduir corbes BH. Els amperímetres  $A_1$  i  $A_2$  mesuren el corrent principal i el corrent d'histèresi respectivament, tot i que en molts casos l'últim no és necessari. Es torna a fer èmfasi en el fet que, tot i haver-se fet servir tradicionalment, aquest no és l'únic circuit que permet obtenir corbes d'histèresi amb el mètode balístic. Amb una font d'alimentació bipolar, per exemple, es pot invertir el sentit del corrent sense necessitat d'incorporar interruptors inversors i resistències variables per arribar als mateixos resultats. Per saber més dels circuit elèctrics per a l'obtenció de corbes BH, vegeu l'apartat 4.4.1.

És en el circuit magnètic i les bobines secundàries on es donen més diferències entre permeàmetres. La bobina de magnetització  $N_1$  envolta, en aquest cas, la part del circuit magnètic del *yoke*, però també pot estar enrotllada al voltant de la mostra. En la major part dels permeàmetres, la densitat de flux  $B$  es mesura amb una bobina secundària (a la imatge, denotada per  $N_2$ ), que envolta la mostra. En canvi, la bobina  $N_3$ , que mesura el camp aplicat  $H$ , no és un component comú de tots aquests dispositius: en ocasions  $H$  es pot calcular a partir del corrent de magnetització, com en el cas de l'anella. Per tal d'alternar la mesura entre  $B$  i  $H$  es fa servir l'interruptor  $S_3$ , connectat aquí a un integrador electrònic (que també podria ser un galvanòmetre balístic o algun altre dispositiu).

Seguidament es fa una descripció més a fons els components que formen part del circuit magnètic d'un permeàmetre, així com de les bobines de magnetització, les bobines

secundàries per a  $B$ , els dispositius per a trobar  $H$  i les bobines de compensació.

### 4.2.1 Circuit magnètic del permeàmetre

En realitat no es tracta d'un component, sinó d'un conjunt d'elements format per la mostra, el/s *yoke*/s i la resta de peces que assegurin el camí de retorn per al flux magnètic. És l'estructura bàsica del permeàmetre i una de les parts més delicades, ja que tots els elements que la componen han de tenir molt bon contacte magnètic entre ells per evitar que es produeixin pèrdues de flux i altres fenòmens com l'aparició de pols en alguna de les peces. És per aquest motiu que presenten certa complexitat mecànica en el disseny i en la producció, i es fa palesa la necessitat de treballar amb toleràncies molt petites.

La majoria de permeàmetres estan constituïts per un sol *yoke* i la mostra, però en alguns tipus el circuit magnètic el componen més d'una barra i més d'un *yoke*. L'exemple més simple d'aquest cas és el permeàmetre de doble barra d'Ewing, que està constituït per dos *yokes* mòbils, la mostra i una barra auxiliar d'igual mida i material (és a dir: de propietats pràcticament idèntiques a les de l'espècimen).

### 4.2.2 Mostra

La mostra forma part del circuit magnètic. La seva secció transversal pot ser quadrada, rectangular o circular, tot i que en alguns permeàmetres és necessari treballar amb angles rectes. En el permeàmetre Fahy Simplex, per exemple, cada un dels extrems de la mostra es troba entre el *yoke* i un bloc ferromagnètic tou: això implica que, com que les peces del circuit magnètic han de tenir molt bon contacte entre elles, la seva secció ha de ser per força quadrada o rectangular i les seves cares, paral·leles entre elles. De fet, en general, per assegurar una bona juntura magnètica, la majoria de permeàmetres treballen amb aquest tipus de mostres.

Un altre requeriment que han de complir és que la seva secció transversal sigui uniforme en tota la llargada que actua de camí per al flux magnètic; de no ser així es produirien pèrdues de flux, a causa de les quals el valor mesurat de  $B$  no es podria considerar precís.

Cada tipus de permeàmetre pot treballar amb un rang de llargades i de seccions de mostra diferent. És molt important que la mida de l'espècimen sigui adequada al permeàmetre, sobretot pel que fa a la longitud. Una mostra massa curta pot implicar una obertura o un mal contacte en el circuit magnètic i l'aparició de pèrdues de flux. En els casos en què sigui necessari treballar amb mostres de poca llargada és possible utilitzar *extensions polars* als

seus extrems (en anglès, *pole pieces*), que serveixen per dirigir el camp i proveir un camí tancat per al flux magnètic; però s'ha de tenir en compte que el seu ús possiblement repercutirà negativament en la precisió dels resultats.

### 4.2.3 Nucli

El nucli o *yoke* ha d'estar fabricat d'un material de molt baixa reluctància i de permeabilitat alta. Quan es treballa amb *yokes* laminats, cosa freqüent perquè ajuden a reduir les pèrdues degudes als corrents de Foucault, cal dissenyar amb uns materials concrets. N'és un exemple el permeàmetre Fahy Simplex, que utilitza acer al silici (amb un contingut de 2 o 3% de Si), un material ferromagnètic tou. Altres models de permeàmetre més nous segueixen utilitzant materials amb aquestes característiques, com altres aliatges de Fe-Si o de Fe-Ni [3]. Quan es decideix treballar amb nuclis compactes, se solen triar materials amb permeabilitats més baixes, perquè el *yoke* no se satura massa ràpid i per tant es redueixi el rang de punts mesurats de la corba en què aquest fet no incideixi sobre els valors obtinguts. Dos exemples en són acers de baix contingut de carboni o ferro tou [3].

Normalment els *yokes* tenen forma d'U, però també poden presentar forma de rectangle en què un que dels costats és la mostra (és a dir, tenen forma d'una C rectangular). En aquest cas, hi ha l'opció de fabricar el *yoke* com un de sol, però en general, per conveniències en la manufactura, es fabrica cada costat per separat. Com que tots els elements han de tenir un bon contacte entre ells, la millor manera de resoldre mecànicament el problema que els costats siguin peces separades és encaixar-ne els extrems mitjançant juntes escalonades. És clar que hi ha altres solucions (més populars tradicionalment i ara més obsoletes), però aquesta és la que en l'actualitat es fa servir més sovint. Dos exemples de permeàmetres en què es poden veure juntes esglaonades són el tipus A i tipus B de l'IEC [3].

És freqüent que els *yokes* tinguin les cantonades arrodonides per reduir els efectes de vora. Amb *yokes* rectangulars, els girs abruptes de  $90^\circ$  produeixen en el permeàmetre un fenomen no desitjat: les cantonades i les vores de saturen més ràpidament que la resta del circuit, amb la conseqüència que apareixen pèrdues de flux. Per això pot ésser interessant treballar amb un *yoke* circular, la forma del qual, per altra banda, concideix més acuradament amb el camí teòric de retorn del flux que en quan es fan servir angles rectes.

Pot haver-hi més d'una meitat de *yoke* la mostra, com en el cas dels permeàmetres de tipus A i de tipus B de l'IEC o al NBS High-H de Sandford i Bennet, en què se'n fan servir dues per envoltar l'espècimen, de tal manera que s'obté un circuit magnètic simètric. De

vegades aquesta configuració és desitjable, ja que la simetria en el circuit afavoreix que la distribució d' $H$  a través de la secció de la mostra sigui uniforme, cosa especialment important per a punts de la corba d'histèresi en què  $H$  i  $B$  tenen direccions oposades [8].

Un tret comú que comparteixen tots els *yokes* és que, per assegurar-se que la seva reluctància quasi bé no té contribució al circuit magnètic, la seva secció transversal es fa força gran en relació a la de la mostra. Per altra banda, una secció del *yoke* gran també pot ajudar a reduir els efectes de la saturació sobre les mesures, ja que el nucli triga més a saturar-se.

#### 4.2.4 Bobina de magnetització

La bobina de magnetització és un element comú de tots els permeàmetres. Proporciona la força magnètica necessària per a magnetitzar el circuit magnètic. Forma part del circuit elèctric primari del permeàmetre i hi circula el corrent de magnetització, que magnetitzarà el *yoke* i la mostra. Sol estar formada de més d'una capa d'espines, tot i que no té per què ser el cas: dependrà de la força magnètica que calgui aplicar al circuit i de la llargada màxima disponible de la bobina.

No sempre envolta la mostra; de fet, en alguns permeàmetres està enrotllada al *yoke*. Els permeàmetres Fahy Simplex i tipus B de l'IEC presenten bons exemples de bobines de magnetització que envolten el *yoke* en comptes de la mostra. D'entrada, podria semblar que aquesta estratègia afavoreix la no-uniformitat del camp magnètic  $H$  a la mostra, perquè la força magnetomotriu cau fora de la bobina de magnetització, cosa que implica que es produeixen pèrdues de flux en el circuit. De fet és així, però el principi segons el qual operen permet obtenir resultats acurats fins i tot en aquestes condicions; fins al punt que són dos dels models de permeàmetres que més es fan servir actualment.

Tot i així, en la majoria de permeàmetres la bobina de magnetització està enrotllada al llarg de tot l'espècimen. Alguns dels permeàmetres amb aquesta configuració són el de Burrows, l'Illoviçi, el NBS MH i el tipus A de l'IEC.

#### 4.2.5 Bobina secundària ( $B$ )

La bobina secundària o bobina  $B$  forma part del circuit secundari o induït, i mesura la densitat de flux magnètic a la mostra. Consta d'un bobinat d' $N$  voltes que depenent del tipus de permeàmetre pot o no abastar tota la longitud de la mostra, tot i que normal-

ment, sempre que sigui possible per les característiques del dispositiu, s'opta per la segona opció.

És preferible que la bobina  $B$  estigui molt a prop de la superfície de la mostra, encara que per flexibilitat moltes vegades aquesta proximitat no és viable. Cal tenir en compte que, enrotllada directament sobre l'espècimen, cada cop que calgués canviar la mostra seria necessari refer el bobinat. És per aquest motiu que normalment es bobina al voltant d'un material no magnètic (llautó en el cas del Fahy Simplex [9], Micarta pel NBS MH [10], etc.) que es col·loca al permeàmetre de manera que envolti la mostra. En aquests casos, segons la norma ASTM A341/A341M, cal fer, bé sigui a través de càlculs o físicament amb l'ajuda d'un bobinat de compensació automàtica, una correcció per a la contribució al camp magnètic observat del flux de l'aire que hi ha entre la bobina  $B$  i la mostra. Per saber més d'aquest fenomen, vegeu l'apartat 4.3.4.

En general no hi ha gaires variacions d'aquest component entre permeàmetres, perquè la mesura de  $B$  és relativament senzilla en comparació amb la del camp magnètic.

#### 4.2.6 Mètodes de càlcul i mesura d' $H$

L'elecció de la millor manera d'obtenir el valor de la força magnètica és una de les parts més conflictives del disseny d'un permeàmetre. Primer cal triar si es vol calcular o es vol mesurar. La diferència entre els dos mètodes és notable i determina no només l'estructura del circuit magnètic del dispositiu, sinó també el principi segons el qual opera.

Alguns dels primers permeàmetres utilitzaven el corrent de magnetització per calcular  $H$  tal i com es feia amb l'anella. És el cas del permeàmetre de Hopkinson. La idea d'aprofitar aquest corrent i prescindir d'un dispositiu extra per a trobar el camp magnètic va demostrar-se útil i factible, però només en el cas que no hi hagués pèrdues de flux al circuit. D'aquí sorgeixen permeàmetres com el Burrows o l'Illovici, que, mitjançant un bobinat de compensació, mantenen tot el camí del flux a un mateix potencial magnètic i permeten calcular  $H$  amb aquesta suposició (vegeu els apartats 4.3.1 i 4.3.2). Actualment aquest principi encara se segueix fent servir en alguns models, com el proposat per Kašpar [11], tot i que els permeàmetres compensats clàssics han quedat en la seva majoria obsolets pels desavantatges que presenten en relació al temps de presa de mesures [3].

La segona manera de trobar  $H$  és mitjançant sensors d'inducció, com bobines o sensors Hall, de més o menys complexitat. Es fan servir quan no es pot assegurar que no es produeixen pèrdues de flux al circuit magnètic i en conseqüència cal fer una mesura directa.

Els primers models de permeàmetre que operaven amb sensòrica ho feien amb una bobina estacionària amb nucli d'aire, col·locada entre dos blocs d'un material ferromagnètic tou de manera que els seus extrems fessin molt bon contacte amb els de la mostra [9]. Així la bobina mesurava el camp magnètic que magnetitzava la barra.

Més endavant van sorgir altres mètodes diferents, com l'ús de *bobines rotatives* [10] [12], que permetien trobar el valor d' $H$  directament en comptes de calcular-lo en termes d'una diferència entre dos valors de la corba d'histèresi. Avui dia es fan servir més altres tipus de sensors, tot i que l'ús de les bobines descrites encara està estès.

Actualment, el *sensor d'efecte Hall* és un dels dispositius més àmpliament utilitzats entre permeàmetres. Són molt coneguts i molt versàtils, cosa que els fa adequats per a aplicacions molt diverses. Al laboratori d'ALBA s'usen amb molta freqüència. El seu principi de funcionament es basa en l'efecte Hall: en presència d'un camp magnètic, la força de Lorentz fa que es produeixi una desviació del corrent que circula per un conductor prim. Els dispositius Hall requereixen d'un corrent d'alimentació de magnitud petita (entre 1 i 10mA), que s'administra al sensor mitjançant dos terminals. Els dos restants serveixen per a la mesura del voltatge Hall ( $V_H$ ), que és proporcional a la densitat de flux magnètic  $B$ . El seu control es realitza per corrent i han de ser molt estables.

A continuació es mostren alguns dels avantatges de fer-ne servir [13]:

- Poden mesurar la magnitud de  $B$  fins i tot quan el camp és estàtic.
- Operen en un rang molt ample de camps magnètics.
- Es poden fer servir en geometries complexes.
- Són relativament barats i existeix un mercat molt gran amb moltes varietats de sensors d'efecte Hall, per la qual cosa és possible trobar un model adequat a les necessitats de l'aplicació.

I a la següent llista es descriuen els desavantatges del seu ús:

- Teòricament (en un sensor d'efecte Hall infinit), el voltatge  $V_H$  hauria de ser una funció lineal de  $B$ . A la pràctica existeix una no-linealitat deguda principalment a la dependència del camp del coeficient de Hall  $R_H$  i del factor geomètric  $G$ , que pren valors de 0 a 1.
- En absència de camp magnètic apareix un voltatge parasitari (un voltatge d'offset) que canvia amb el seu ús. Per tal que fins i tot quan existeixi un voltatge d'offset important el sensor pugui operar correctament per camps magnètics baixos, és

necessari que presenti una molt bona sensibilitat.

- La seva dependència a la temperatura causa l'existència d'un voltatge d'offset.
- Existeixen també efectes de soroll que limiten la precisió del dispositiu.
- Per les raons anteriors, és necessari realitzar una calibració de l'efecte Hall per saber amb precisió la correspondència entre  $V_H$  i  $B$ .

En el permeàmetre tipus B de l'IEC s'utilitza una *bobina Rogowski-Chattock* (la variable de la bobina de Rogowski per a camp magnètic) per mesurar  $H$ . Aquest dispositiu, que s'ha començat a fer servir més recentment en permeàmetres, és una bobina helicoidal que envolta un material-no magnètic i aïllant, doblegada de manera que els seus dos extrems toquen el mateix pla d'una superfície [14], en aquest cas la mostra. Alguns dels avantatges i desavantatges que presenta són els següents [15]:

- Permet mesurar el camp magnètic directament a la superfície de la mostra, ja que els seus extrems es poden col·locar molt a prop d'aquesta.
- Una bobina Rogowski-Chattock ben fabricada proporciona el mateix voltatge de sortida independentment de la forma que prengui entre els extrems.
- És sensible a la no-uniformitat del camp magnètic a la mostra.
- Cal fer servir bobines Helmholtz per calibrar el dispositiu.
- Sempre s'han de fer servir acompanyats d'un integrador electrònic.
- La seva fabricació és molt delicada: les espirals dels extrems han de ser completament paral·leles a la mostra i acabar just a les puntes de l'estructura no magnètica sobre la qual està enrotllada la bobina; i el diàmetre d'aquesta estructura magnètica ha de ser molt més petit que la llargada entre els dos extrems de la bobina.

Les *bobines planes de mesura d' $H$*  (en anglès, *Flat H-coil*) són una alternativa a les bobines convencionals. Es basen en el principi que el camp tangencial a dins de la mostra és el mateix que el seu component tangencial a la superfície [16]. Això vol dir que el seu eix ha d'estar el més a prop possible del material (el camp varia molt ràpidament amb la distància), i per tant la bobina ha de tenir una espessor molt fina. El problema és que la seva sensibilitat depèn de la seva secció: com més petita, menys sensible és el sensor. Per això es va proposar fer servir un sistema de dues (o fins i tot més) bobines en sèrie, disposades en cares oposades del material, en què  $H$  a la superfície es podia trobar extrapolant dos valors [17]. Així, ja no és necessari que la bobina tingui un gruix



tan petit i fins i tot pot estar lleugerament allunyada del material sense obtenir grans errors als resultats. És aquesta variant de la bobina plana la que es pot trobar a alguns permeàmetres avui dia.

Aquest tipus de sensor presenta una sèrie d'avantatges i d'inconvenients [18]:

- Es tracta d'una solució molt simple, més que la bobina Rogowski-Chattock.
- El rang de mesura del camp magnètic no té límits, de tal manera que es pot fer servir en tota mena de permeàmetres.
- És molt lineal.
- El fet que només mesuri el component tangencial del camp el fa immune al component ortogonal.
- Sempre s'han de fer servir acompanyats d'un integrador electrònic.
- Tot i fer servir més d'una bobina plana, tenen poca sensibilitat.

#### 4.2.7 Bobines de compensació

Les bobines de compensació són un element imprescindible en alguns tipus de permeàmetre. Es fan servir per compensar la caiguda de força electromotriu en aquelles parts del circuit en què es produeixen més pèrdues de flux, que normalment corresponen a les junctures dels *yokes* o de les extensions polars amb la mostra. El bobinat de compensació pot arribar a fer molt lent el procés d'obtenció d'una corba d'histèresi, fins al punt que en cada mesura sigui necessari ajustar-ne el valor del corrent (com al permeàmetre de Burrows). Es pot buscar, també, un número d'espines adequat perquè pugui operar en tot el rang de força magnètica de la corba, tot i que així la compensació mai serà ideal. En general, però, és l'única manera d'assegurar que la magnetització de la mostra es produeixi uniformement i per això es fan servir molt sovint.

### 4.3 Problemes generals de mesura

El disseny d'un permeàmetre no és una tasca senzilla. Cal tenir en compte molts fenòmens magnètics que sovint no es poden quantificar amb càlculs, sinó que cal recórrer a la simulació o a l'experimentació per valorar-los. Són aquests fenòmens, com les fugues de flux o les pèrdues del nucli, les que acaben determinant com ha de ser i què ha de tenir

el permeàmetre per a funcionar correctament. A continuació s'aprofundeix en aquests conceptes i es relacionaran amb els components explicats anteriorment.

### 4.3.1 Pèrdues de flux

Les pèrdues de flux consisteixen en el principal problema de mesura d'un permeàmetre. És un fenomen inherent en el magnetisme, ja que no és admissible considerar el flux magnètic com l'equivalent absolut al corrent elèctric: per molt que se li faciliti el camí amb materials de baixa reluctància, no és possible confinar-lo a un circuit.

Un permeàmetre ben dissenyat té tots els elements disposats per evitar que es produeixin pèrdues de flux o, en cas que siguin inevitables i puguin afectar les mesures (per exemple, si es prescindeix de la bobina H), aportar-hi una compensació en forma de força magnetomotriu. Perquè la condició de pèrdues de flux nul·les sigui possible cal que totes les parts del circuit es trobin al mateix potencial magnètic. És a dir: l'augment de potencial magnètic per cada unitat de llargada degut al corrent ha de ser igual que la disminució de potencial magnètic a causa de la reluctància del material en aquell punt [1].

Si en una part del circuit entre dos punts la secció fos més petita o tingués menys permeabilitat es produirien pèrdues de flux, perquè una part del circuit es trobaria en un potencial magnètic superior que una altra i les línies de flux d'escaparien del punt amb més potencial al punt amb menys potencial. El mateix passaria si la secció o la permeabilitat fossin més grans en aquell tros, però en sentit contrari a la circulació del flux. Per això és molt important que no hi hagi irregularitats geomètriques o en el bobinat [1].

Les pèrdues de flux no poden trobar-se analíticament. Abans de l'aparició de programes de simulació amb elements finits calia calcular-les a través d'experiments, una tasca cara i lenta. Actualment és possible estimar-les i quantificar-les fins a cert punt, sempre tenint en compte que alguns factors no predictibles del model físic i els defectes que pugui tenir un cop mecanitzat poden alterar els valors calculats, amb incidència sobre la fiabilitat de l'instrument.

### 4.3.2 Reluctància del *yoke* i de les juntures

Una de les consideracions que s'ha de tenir en compte quan es vol dissenyar un permeàmetre és com negligir o vèncer la reluctància del *yoke* i de les juntures entre peces. Si bé el *yoke* es fabrica sempre d'un material ferromagnètic tou, no per això es pot negligir la seva reluctància, perquè encara pot tenir una contribució considerable a la reluctància

total del circuit. Les juntures també tenen reluctància perquè el contacte entre els diversos elements magnètics no pot ser perfecte, per la qual cosa existirà un petit entreferro de llargada molt petita però d'alta reluctància.

Anteriorment s'ha discutit configuració del doble *yoke* i doble barra introduïda per Ewing. Aquest tipus de permeàmetre permet que, per a dues distàncies diferents entre els *yoke* i les bobines de magnetització, es pugui eliminar la reluctància dels *yoke* i de les juntures si s'assumeix que per ambdós casos és la mateixa. És una manera de tractar el problema de la reluctància del *yoke* i de les juntures, però n'hi ha d'altres.

Com ja s'ha mencionat, un gran nombre de permeàmetres fan servir bobines de compensació amb l'objectiu d'aplicar a les parts més problemàtiques del circuit una força magnetomotriu que en compensi la reluctància. Si s'aconsegueix que totes les parts del circuit tinguin el mateix potencial magnètic, cosa que passa quan es compensen adequadament, no hi haurà fugues de flux entre elles. Normalment les bobines de compensació es troben als *yokes* i a les juntures amb la mostra.

### 4.3.3 Pèrdues al circuit magnètic

Com s'explica a l'apartat 4.4, les corbes d'histèresi es tracen en condicions quasi-estàtiques, cosa que implica que existeixen estats transitoris i que per tant el procés té una freqüència. Les pèrdues al circuit magnètic es deuen principalment als efectes que aquesta freqüència causa al circuit magnètic.

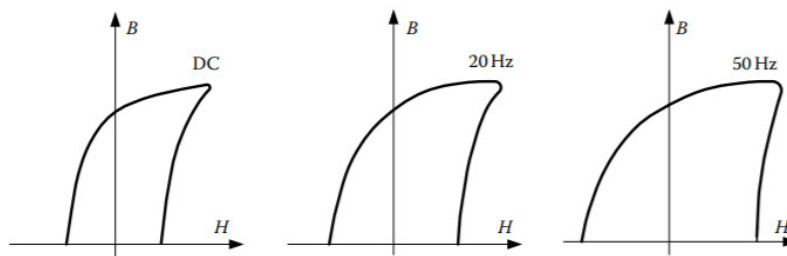


Figura 4.3: *Eixamplament del cicle d'histèresi conforme augmenta la freqüència de cicle. Aquest fenomen es deu a les pèrdues dinàmiques.*  
Extret de: [16]

Les pèrdues totals al circuit magnètic es poden calcular com la suma de tres tipus de pèrdues: les d'histèresi (estàtiques), les degudes a corrent de Foucault (dinàmiques) i les anòmales (també dinàmiques). S'expliquen a continuació, en els següents tres subapartats.

La conseqüència de les diferents pèrdues al circuit magnètic és un eixamplament de la corba d'histèresi, que augmenta segons ho fa la freqüència amb què es traça un cicle. Es mostra un exemple a la imatge (4.3).

### Pèrdues d'histèresi

Les pèrdues d'histèresi són pèrdues estàtiques degudes a la irreversibilitat de l'estat magnetitzat d'un material. Augmenten amb les impureses i els defectes d'aquest material, perquè la seva presència resulta en un camp coercitiu més baix i en una susceptibilitat inicial més gran [16].

Les pèrdues en un cicle vénen donades per l'àrea del la corba d'histèresi, és a dir, per la següent equació:

$$E_H(t) = \mu_0 \int_{cicle} H dB \quad (4.3)$$

I per tant, per una freqüència  $f$ , es determinen com:

$$P_H(t) = f \cdot \mu_0 \int_{cicle} H dB \quad (4.4)$$

### Pèrdues per corrents de Foucault

Les pèrdues per corrents de Foucault són pèrdues dinàmiques que apareixen quan un material conductor se sotmet a l'influència un camp magnètic variable. Es creen llavors corrents induïts (també anomenats corrents paràsits) que creen un camp magnètic oposat a l'aplicat i que es dissipen en forma de calor: és a dir, influeixen sobre el camp magnètic observat i augmenten indesitjablement la temperatura del sistema. La seva presència és molt important quan es treballa amb corrent altern; però en els mètodes de mesura en CC que s'explicaquen en aquest document també convé tenir en compte que poden tenir una incidència negativa en els resultats, sobretot pel mètode continu (vegeu l'apartat 4.4.1).

A més de la freqüència, dos paràmetres influeixen molt en les pèrdues per corrents de Foucault: la resistivitat i l'espessor del material. En condicions quasi-estàtiques, el càlcul del valor instantani d'aquestes pèrdues es pot fer amb la següent equació [19]:

$$P_{CF}(t) = \frac{\sigma t^2}{12} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (4.5)$$

On  $\sigma$  és la conductivitat del material,  $t$  la seva espessor i  $B$  el camp magnètic que tra-

vessa perpendicularment la seva secció transversal. Pot ser útil l'expressió de les pèrdues mitjanes durant el cicle de magnetització, que per a un rati constant de canvi de  $B$  (és a dir, un senyal triangular) és la que es mostra a continuació:

$$P_{CF}^{TRI} = \frac{4\sigma t^2}{3} B_{max}^2 f^2 \quad (4.6)$$

On  $B_{max}$  és el camp màxim i  $f$  és la freqüència de magnetització. Aquesta fórmula interessa força perquè en el mètode continu (apartat 4.4.1) precisament s'adopta un rati  $dB/dt$  constant com a estratègia de magnetització.

En les expressions que s'acaben d'introduir es pot observar que com més petita l'espessor del material menors són les pèrdues dels corrents de Foucault. El mateix passa amb la conductivitat del material. Per altra banda, augmenten amb el quadrat de la freqüència; això demostra fins a quin punt depenen d'aquesta.

Un altre valor que pot interessar conèixer és el camp magnètic degut als corrents de Foucault. Assumint que el material és homogeni, que no hi ha efectes de desmagnetització pròpia i que la magnetització  $M$  i la inducció  $B$  no varien en la direcció de l'eix perpendicular a la secció transversal de la barra, es pot calcular segons la següent expressió [19]:

$$j(y, t) = \sigma \frac{dB}{dt} y \quad (4.7)$$

On  $y$  és un punt de la direcció en què creix l'espessor del material situat entre  $t/2$  i  $-t/2$  (si es pren el centre de la barra com a referència). Treballant a baixes freqüències, se sap que  $H_{CF} \ll H_a$  (on  $H_a$  és el camp aplicat), per la qual cosa es pot considerar que  $B$  i  $dB/dt$  són independents d' $y$ , i per tant, aplicant la llei d'Ampère, s'arriba a la següent equació [16]:

$$H_{CF} = -\frac{\sigma}{2} \frac{dB}{dt} \left( \frac{d^2}{4} - y^2 \right) \quad (4.8)$$

Perquè aquesta última equació es pugui aplicar s'han de complir les següents condicions:

- L'objecte d'estudi ha de tenir forma de barra i una espessor molt més petita que l'anomenada *profunditat de penetració* (o sigui, que *espessor*  $\ll \delta$ ). Com s'explica més endavant, aquesta condició NO es compleix en el cas estudiat.
- A més, s'ha de complir que l'espessor de la barra sigui molt més petita que l'amplada (*espessor*  $\ll$  *amplada*).

- La longitud ha de ser molt més gran que l'espessor i l'amplada (*espessor, alçada*  $\ll$  *llargada*) per tal de poder negligir els extrems en el càlcul i desestimar els efectes de la creació de pols magnètics.
- Les condicions han de ser estacionàries (és a dir, les freqüències, o els ratis de canvi del camp magnètic, molt petites).

La profunditat de penetració es pot conèixer mitjançant la següent expressió:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (4.9)$$

Per a freqüències, permeabilitats i conductivitats altes la profunditat de penetració adopta valors molt petits, per la qual cosa l'objecte sotmès a un camp magnètic variable, en aquest cas la mostra, ha de ser molt prim perquè es compleixi la primera de les condicions anteriors. Tots els materials que interessa caracteritzar en aquest treball tenen permeabilitats molt elevades a la seva zona lineal i una conductivitat també molt gran, motiu pel qual és inevitable l'incompliment de l'inequació *espessor*  $\ll$   $\delta$  amb el tipus de mostra estudiat, encara que es respectin les condicions quasi-estàtiques.

Deixant aquest fet de banda, es pot observar que el camp màxim degut als corrents de Foucault es dona al pla del mig de la barra. El que demostra és (altra vegada) com de dependents de l'espessor del material són els corrents de Foucault. Per tots aquests motius es laminen els *yokes* i les mesures fetes sobre espècimens gruixuts sotmesos camps variables (fins i tot si el rati de canvi de la inducció és constant) requereixen de temps molt llargs fins que desapareixen els efectes dels corrents de Foucault. Com es discuteix més endavant, és la principal problemàtica del mètode continu, però també suposa un problema considerable en l'anàlisi balístic.

El càlcul analític de les variables relacionades amb els corrents de Foucault és de molt tediós desenvolupament i difícil aplicació, i només es pot utilitzar si es treballa en 1D o 2D. Per això el més freqüent és fer servir mètodes numèrics per trobar les solucions de les equacions dinàmiques. Aquí entren en joc els programes d'elements finits com Opera o Ansys.

Un dels efectes dels corrents de Foucault més notoris en el cas d'aquest treball és el del retard de la densitat de flux magnètic a l'interior del material com a resposta a una variació externa de la força magnètica. En lloc de variar de la mateixa manera i alhora que ho fa el camp, apareix una constant de temps que condiciona la funció de la *fem* a la bobina secundària de B i el tractament del senyal.

El càlcul de la constant de temps  $\tau$  es pot aproximar amb la següent equació [3]:

$$\tau = \mu_o \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot d^2 / 8 \quad (4.10)$$

En aquest treball, l'expressió anterior es pot fer servir només com a mètode de comparació qualitatiu, ja que no contempla els següents aspectes:

- En realitat, la permeabilitat no és constant: la fórmula no contempla la no-linealitat del material.
- Aquesta fórmula és per a un *step*. Més endavant s'explicarà que el canvi de corrent a la font es fa, més aviat, mitjançant una rampa de pendent elevat.
- L'expressió no té en compte si el permeàmetre és simètric o asimètric.

### Pèrdues anòmales

Les pèrdues anòmales, un altre tipus de pèrdues dinàmiques, són aquelles que no es poden calcular com a pèrdues derivades de l'histèresi i dels corrents de Foucault, malgrat que tenen una estreta relació amb aquestes últimes. S'han de tenir en compte perquè poden arribar a ser tan importants en magnitud com les pèrdues de Foucault. Són una conseqüència dels efectes dinàmics del moviment de les parets de Bloch (i per tant, de l'existència dels dominis magnètics), la no-homogeneïtat del material i de la magnetització no uniforme [16].

Els moviments de les parets de Bloch causen variacions de flux en els dominis, que resulten en corrents paràsits de magnitud microscòpica induïts a les seves proximitats. És per aquest motiu que una manera de reduir les pèrdues anòmales és buscar, durant la fabricació del material, una estructura magnètica en què les parets de Bloch siguin paral·leles entre elles i no s'hagin de desplaçar tant durant el procés de magnetització [20]. Reduint la distància entre les parets (o reduint la mida dels dominis) també es pot aconseguir una disminució de les pèrdues.

El càlcul de les pèrdues anòmales és complicat i existeixen diversos models que el fan possible. En aquest document no s'expliquen perquè està fora de l'abast del treball.

#### 4.3.4 Compensació de la contribució del flux de l'aire

Normalment, les bobines secundàries que mesuren la densitat de flux magnètic  $B$  tenen un diàmetre lleugerament més gran que la mostra; és a dir, la seva secció transversal és

més gran que la de la barra. Per a valors de  $B$  petits la contribució del flux entre els dos elements pot arribar a ser negligible, però quan  $B$  és gran representa una font d'error en els resultats que s'ha de tenir en compte.

Si es desitja, és possible calcular aquest error numèricament per cada mesura que es pren. Una altra manera de fer-ho és mitjançant una inductància mútua com a compensació automàtica.

Per la bobina primària d'aquesta inductància hi circula el corrent de magnetització, i la secundària està connectada en sèrie, amb la polaritat invertida, a la bobina de  $B$ . És possible trobar una inductància mútua amb la qual, quan s'inverteixi el corrent en el circuit primari (durant el procediment d'obtenció de la corba d'histeresi amb el mètode de les inversions), es generi una fem al secundari igual a la part de la fem generada a la bobina de  $B$  que correspon a la contribució de l'aire a  $B$ . D'aquesta manera s'obté, a través d'aquest muntatge i d'un integrador, el valor real de  $B$  per a cada punt de la corba d'histeresi.

### 4.3.5 Deformació mecànica

La deformació mecànica pot causar la no-homogeneïtat dels materials i un deteriorament de les seves propietats magnètiques. A l'hora de fabricar el permeàmetre i mecanitzar la mostra s'ha de tenir molta cura, ja que la més petita deformació pot provocar canvis bruscos en la permeabilitat i, per tant, una deformació de la corba d'histeresi. Aquest efecte afecta especialment les vores del material en què s'ha realitzat el tall [21]. Tant és així que sorgeix l'impediment de transformar una mostra d'una secció concreta a una altra de més petita i sotmetre-la a la mateixa prova per a realitzar les mateixes mesures magnètiques, perquè durant el procés de mecanitzat de desbast es produeixen esforços mecànics a l'interior del material amb efectes adversos en les seves propietats. Això complica força els procediments experimentals. Sandford va parlar breument d'aquest problema en el seu article d'anàlisi del permeàmetre Fahy Simplex [9].

Un altre aspecte en què incideix negativament la deformació mecànica és en la subjecció de la mostra a la resta del circuit magnètic. La impossibilitat d'acoblar-la amb mitjans que podrien comprometre les seves propietats magnètiques entra en conflicte amb la necessitat d'assegurar un molt bon contacte entre l'espècimen i els *yokes*. En alguns casos la fixació és indirecta: en configuracions de doble *yoke*, per exemple, és entre les dues parts del nucli que se subjecta la mostra. En tot cas, no es donen casos en què la barra es foradi i sempre es treballa amb suports de subjecció que puguin assegurar un bon contacte sense comprometre les propietats magnètiques de la mostra.



### 4.3.6 Difusió

L'efecte de retard en el temps a causa de la presència de corrents de Foucault en el material se suma a un altre provocat per un fenomen anomenat *difusió* o, més concretament, *magnetic after-effect* o *viscositat magnètica*.

S'ha observat experimentalment que aquest efecte apareix sobretot en variacions de camp en forma d'*step* [22], és a dir, com les que els fan en el mètode balístic, i a camps molt petits. Tot i així, sol representar una porció petita del retard de  $B$ , ja que la major part està causada pels corrents de Foucault. No és senzill separar aquests dos fenòmens i per fer-ho cal dur a terme experiments especialitzats.

Quantificar la viscositat magnètica analíticament sol representar una tasca àrdua i, en alguns casos, impossible. En canvi, mitjançant mètodes numèrics és un problema de menys magnitud i més fàcil de resoldre.

## 4.4 Mesures en DC

Tot i que quan es parla de permeàmetres es menciona sovint la mesura de les propietats magnètiques dels materials en CC, en realitat l'obtenció de corbes BH es fa sota condicions quasi-estàtiques. Per tal que hi hagi una força electromotriu induïda a les bobines  $B$  i  $H$ , és necessari que es produeixi una variació del flux, que en el cas dels permeàmetres succeeix quan es modifica la magnitud o el sentit del corrent de magnetització. Per tant, encara que molt petita, les propietats del material s'estan mesurant sota una freqüència, i els seus efectes s'han de tenir en compte en la mesura que calgui (cosa que dependrà, sobretot, del mètode d'obtenció de corbes BH que es faci servir).

Com que el senyal de sortida a les bobines adquireix un valor durant la variació de flux i de seguida torna a prendre el valor de zero, és obligatori l'ús d'un integrador analògic o digital (també anomenats fluxímetres).

Un exemple de fluxímetre digital seria un integrador operacional analògic amb un convertidor AD. Aquests dispositius poden presentar una *deriva* en la mesura (el que en anglès s'anomena *drift*), i per tant pot ser necessari utilitzar un circuit de compensació que proporcioni un voltatge d'offset a l'entrada de l'integrador [3]. La integració també es pot fer de manera digital, convertint el senyal a digital i utilitzant algorismes d'integració numèrica. Sovint es recorre a aquesta via, sobretot quan el circuit ha d'anar connectat a un PC que lidera el procés d'obtenció de mesures. Si s'opta per aquesta opció cal parar

atenció al temps de mostreig, que haurà de ser petit perquè l'entrada és una sèrie de polsos, i a l'algorisme que es farà servir per a l'integració.

#### 4.4.1 Mesura de corbes BH: mètodes

Existeixen dos mètodes amb què és possible obtenir corbes d'histeresi en condicions quasi-estàtiques. El primer es coneix com a mètode pas a pas o, pel seu nom tradicional, mètode balístic. Té molta trajectòria històrica per la fiabilitat que presenta, ja que la freqüència amb què es prenen els valors de la corba BH és tan petita que en prou feines té incidència sobre les mesures fetes. De fet, el terme balístic prové de quan encara es feien servir galvanòmetres balístics com a instrument per a trobar  $B$  i  $H$ . Avui dia han quedat obsolets i es fa servir el fluxímetre. El mètode balístic es basa en fer variar el camp aplicat, mitjançant el corrent de magnetització, amb petits increments (i sempre en la mateixa direcció), mentre que els valors de la corba d'histeresi es troben punt a punt i els recull un integrador. El segon mètode, l'anomenat mètode continu, utilitza una font de corrent altern (un generador de funcions) per a variar el camp aplicat de manera contínua. En aquest mètode prenen més importància els efectes generats per efectes dependents de la freqüència, com és el cas dels corrents de Foucault, per la qual cosa s'han de tenir en compte en el seu disseny.

##### Mètode pas a pas o balístic

El mètode pas a pas, com ja s'ha explicat breument, consisteix a anar fent variar el camp magnètic aplicat amb increments mitjançant el corrent de magnetització que circula pel circuit primari. Els valors de sortida s'obtenen per mitjà de la bobina  $B$  i, en el cas que sigui necessari perquè el tipus de permeàmetre ho requereix, la bobina  $H$ , en forma de força electromotriu induïda. Adues bobines es connecten a un fluxímetre analògic o digital i es va traçant la corba d'histeresi.

El que s'obté durant el procés de magnetització és la corba d'histeresi normal, que es defineix com la corba que es pot traçar si s'uneixen les puntes de les corbes d'histeresi del material quan està en procés de magnetitzar-se des d'un estat desmagnetitzat fins a la saturació [3]. Un cop el material està saturat, es procedeix a obtenir el cicle d'histeresi complet, també pas a pas.

S'ha descrit el mètode balístic com un mètode incremental: quan es vol dibuixar una corba BH d'aquesta manera és absolutament necessari partir d'un estat de referència, com pot ser l'estat saturat o desmagnetitzat. Existeixen mètodes de desmagnetitzar el material

de manera controlada. El primer consisteix a escalfar el material fins més amunt de la temperatura de Curie<sup>9</sup> i fer-lo refredar sota la condició que no hi actui cap camp magnètic extern (inclòs el terrestre). El segon es basa en l'aplicació d'un camp extern, l'amplitud del qual es fa baixar progressivament des d'un valor per sobre del camp de saturació fins a zero. Un cop obtinguda la referència, durant el procés de magnetització i obtenció de dades s'ha de tenir controlat en tot moment l'estat del material. D'altra manera, s'hauria de desmagnetitzar i tornar a posar en marxa el procediment.

En el mètode balístic es feia servir tradicionalment una font de corrent constant o un conjunt de bateries i un interruptor inversor. Actualment, per reduir el temps del procediment de mesura, és millor utilitzar una font de corrent bipolar i programable perquè no faci falta actuar físicament sobre el circuit cada cop que s'ha d'obtenir un valor i el procediment no sigui tan llarg i tediós. El circuit elèctric és molt similar al que es mostra a la figura (4.2).

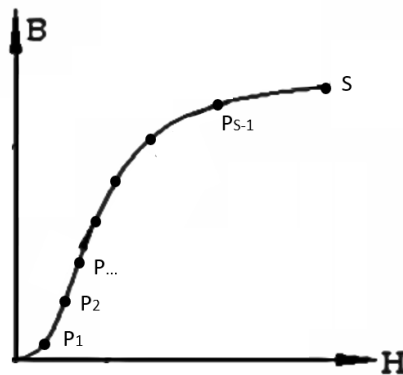


Figura 4.4: Corba normal de magnetització amb els punts descrits al document.

Els elements són els mateixos que s'hi poden observar: S1 per invertir el corrent de magnetització, S2 per fer-lo variar incrementalment, i R1 i R2 per incrementar-ne o disminuir-ne la magnitud. A dins de l'anàlisi balístic ha dos possibles mètodes d'obtenció de la corba d'histèresi, classificats segons com es fa variar el corrent. El primer és el *mètode dels steps* i és el més intuïtiu, ja que el corrent de magnetització es fa variar mitjaçant esglaons des d'un punt inicial fins a un punt final. A la figura (4.5) se'n mostra un exemple. No es recomana que els increments de corrent durant aquest procés tinguin un valor constant, perquè en els últims punts de la corba d'histèresi  $B$  augmenta poc en comparació amb  $H$ : els últims increments haurien de ser més grans i anar creixent progressivament fins a arribar a la saturació [16].

<sup>9</sup>La temperatura de Curie és la temperatura en què els materials perden les seves propietats magnètiques i adquireixen un comportament paramagnètic.

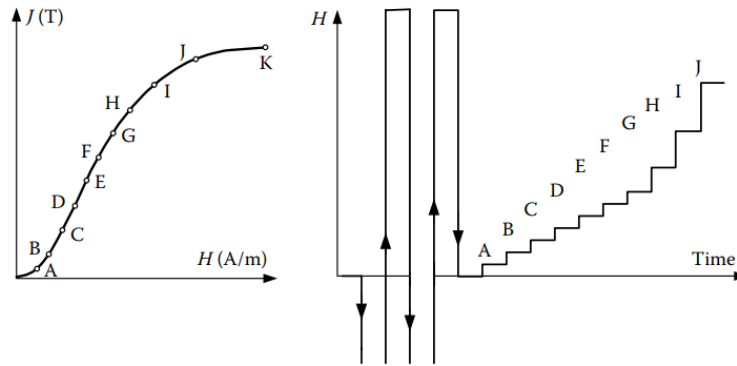


Figura 4.5: *Obtenció de la corba de magnetització pel mètode dels steps. S'hi observen dues coses: la variació d'H és més gran pels punts més alts de la corba, i es fan esglaons incrementals des de zero fins a la magnetització de saturació.*

Amb el mètode dels *steps*, per obtenir els valors del cicle d'histèresi complet es parteix del punt en què el material es troba saturat,  $S$ , a partir del qual es va disminuint gradualment el corrent de magnetització fins a zero (el segon quadrant), i després es traça la part negativa de la corba (el tercer quadrant). El problema si es fa així és que l'increment és molt petit, i per tant el senyal de sortida també. Una altra problemàtica que presenta aquesta metodologia és que es produeixen errors acumulatius que comprometen l'exactitud dels resultats. Existeix un procediment alternatiu anomenat *mètode de les inversions* que consisteix a invertir el corrent des d'un punt de la corba de magnetització a un altre de simètric (és a dir, d'una intensitat de camp positiva a una de negativa amb la mateixa magnitud), tal i com es detalla a continuació:

1. Primer de tot, amb el material desmagnetitzat i coneixent exactament la referència, el corrent de magnetització s'incrementa fins a un valor molt petit ( $H_1$ ) i es fan un seguit d'inversions de corrent amb  $S_1$  per fer entrar el material en un estat simètric cíclic (o *SCM*, per les seves sigles en anglès) entre dos punts simètrics  $P_1$  i  $P'_1$ . En aquest punt, el fluxímetre hauria d'estar desconnectat del circuit.
2. Amb el fluxímetre connectat, es mesura la variació de flux quan s'inverteix el corrent entre els punts  $P_1$  i  $P'_1$  (es recorda que són simètrics). Per assegurar que la mesura és precisa es recomana fer la mitja entre els valors obtinguts per dues inversions de corrent al mateix punt.
3. A continuació es torna a incrementar el corrent fins als punts  $P_2$  i  $P'_2$ . Es repeteix l'operació d'invertir els corrents dues vegades per fer dues mesures i calcular-ne la mitja.

4. El procés es repeteix fins que s'arriba al punt de magnetització de saturació  $S$ , quan s'haurà acabat d'obtenir la corba d'histèresi normal.

Per obtenir els valors del cicle d'histèresi complert es parteix del punt en què el material es troba saturat,  $S$ , amb el punt simètric  $S'$ . Amb aquests punts com a a valors de referència, el procediment de mesura s'explica a continuació, amb la figura (4.6) com a referència:

1. Es parteix del punt  $S$ , quan el material està saturat. Se suposa que s'han fet les inversions de corrent necessàries per portar el material a un estat cíclic. En aquest moment l'interruptor S1 està obert i no hi ha inversió de corrent. S2 està tancat perquè la intensitat de magnetització en aquest punt és la màxima de tot el procediment.
2. Per obtenir els punts previs a la romanència (que correspon al punt  $R$ ), com per exemple  $P_3$ , es regula R2 de tal manera que quan S2 es tanqui es produeixi una caiguda de voltatge i una variació de flux; és a dir, es disminueix la magnitud del corrent de magnetització.
3. S'apunten els valors de  $B$  i  $H$  en aquestes condicions. A continuació, S1 i S2 es tanquen i s'inverteix el corrent de magnetització, operació que porta fins al punt  $S'$ . Des d'aquí, es torna a fer la mesura i es troba la mitja entre les dues, tal i com s'ha fet per la corba de magnetització. Es repeteix el procés fins que s'arriba al punt  $R$ .
4. Pels punts que es troben més enllà del punt  $R$ , és a dir, al segon i tercer quadrant (com el punt  $P_4$ ), es parteix altra vegada del punt  $S$ , es passa pel punt  $R$  reduint el corrent a zero amb S2 obert, i posteriorment, en havent revertit el corrent amb S1, es fa una mesura al punt  $P_4$ . S'ha de tornar a evaluar  $P_4$  partint des de  $S'$  i fer la mitja entre els dos valors obtinguts.
5. El procediment es repeteix per un nombre concret de punts fins que s'arriba a  $S'$ , moment en què s'haurà obtingut el segon i el tercer quadrant del cicle d'histèresi. Ja no cal continuar amb el procediment, perquè l'altra meitat del cicle és simètric a la corba obtinguda.

De tot aquest procediment tan detallat s'extreu la conclusió que el mètode pas a pas és per si sol un mètode molt lent, fins i tot si s'automatitza fins a cert punt amb una font bipolar programable, motiu pel qual no és adequat per a aplicacions industrials. Per contra, és el mètode preferent en els laboratoris de mesures magnètiques i en l'àmbit de la recerca, ja que proporciona molta exactitud en els resultats i, tot i tediós, és de simple operació.

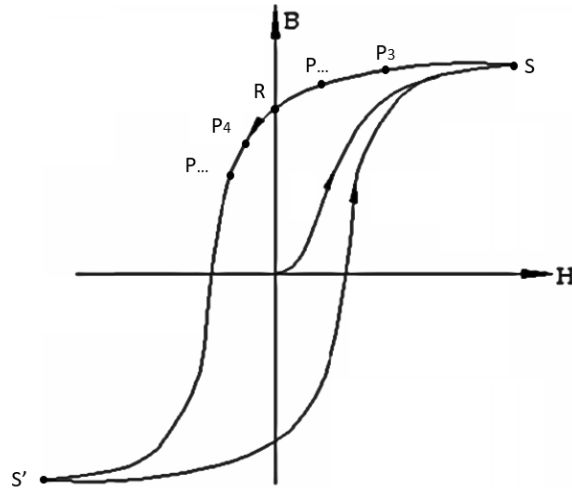


Figura 4.6: Corba de magnetització i cicle d'histeresi complet amb els punts descrits al document.

### Mètode continu o histeresígraf

El mètode continu o histerígraf es fa servir quan el mètode balístic no pot complir amb els requeriments industrials d'altra freqüència o quan es vol conèixer alguna característica magnètica del material que no mostra la corba d'histeresi en CC<sup>10</sup>.

Això no vol dir que treballi amb freqüències altes ni que no permeti el traçat del cicle d'histeresi tal i com s'ha explicat: en realitat, s'intenten reproduir les condicions quasi-estàtiques del mètode balístic treballant freqüències prou baixes per evitar la influència dels corrents de Foucault. La corba obtinguda serà similar, tot i que molt sovint no igual, a la corba en CC.

El problema consisteix a determinar aquesta freqüència. Com més petita sigui, més petit serà el senyal de sortida i més complicacions existiran per mesurar l'inducció. Per altra banda, cal assegurar que el camp magnètic degut als corrents de Foucault sigui negligible respecte el camp coercitiu o els resultats que s'obtidran seran nefastos. Això imposa períodes de magnetització molt elevats, ja que la mostra s'ha de magnetitzar a un ritme prou baix per evitar els efectes deguts als corrents paràsits. Cal tenir en compte, a més, que com més gruixuda la mostra més gran serà aquest temps; i per tant es fa difícil treballar amb barres i espècimens més o menys voluminosos.

<sup>10</sup>Per exemple, alguns materials presenten cicles d'histeresi re-entrants: un cop portat a l'estat cíclic, hi ha un punt en el segon i en el quart quadrant en què, passat un valor d' $H$ , es produeix un retrocés i el camp coercitiu és més petit que el d'un punt anterior situat al mateix quadrant  $H_n$ . Aquesta característica no és visible amb el mètode balístic convencional [3].

Amb el mètode de l'histeresígraf existeix el requeriment de mantenir el rati  $dB/dt$  constant per a controlar millor i minimitzar la influència dels corrents de Foucault. Si en comptes del rati de canvi de la inducció es controla  $dH/dB$ , que d'entrada semblaria el més lògic i senzill perquè correspon al corrent de magnetització, el que passa és que el cicle d'histeresi s'eixampla pels laterals i els punts que corresponen a aquestes zones són erronis. El mateix efecte el causen freqüències massa altes, i es deu a les pèrdues dinàmiques (sobretot per corrents de Foucault) i a la no-linealitat del material, que provoca canvis bruscos del rati  $dB/dt$  si no es controla [3].

Es pot implementar un sistema de traçat de la corba d'histeresi tant analògic com digital, tot i que per la primera opció sorgeixen complicacions derivades de la petita magnitud del senyal de sortida i de la resistència del circuit primari. La idea bàsica que comparteixen els dos és que es genera un senyal d'entrada sobre el qual s'estableix un control per a assegurar que el rati de canvi de la inducció és constant, mentre que alhora es mesuren els punts desitjats i un PC dibuixa la corba d'histeresi.

Existeix més d'una manera de resoldre el circuit. Una és mitjançant un circuit biestable que genera una ona rectangular que després és comparada amb el senyal  $dB/dt$  provinent d'una bobina addicional [16]. El guany de l'amplificador integrador es fa gran perquè pràcticament no existeixi diferència entre els dos senyals, cosa que assegura que el corrent de magnetització mantingui constant  $dB/dt$ . Aquesta seria una solució analògica, però en l'actualitat no és freqüent veure'n pels problemes que se'n deriven i que es poden corregir fàcilment treballant en digital.

Es pot fer en digital amb un muntatge que compari numèricament el rati  $dB/dt$  mesurat amb el desitjat i actui en temps real sobre el corrent de magnetització per corregir-lo. Un generador de funcions genera un senyal semblant al rati de canvi del flux magnètic desitjat. Cal passar el senyal per un amplificador de transconductància abans de subministrar-lo al circuit en forma del corrent de magnetització, que circula pel primari. La tensió induïda a la bobina  $B$  al secundari, que si es vol fer la correcció del flux de l'aire es troba connectada en sèrie amb polaritat oposada amb el secundari d'una inductància mútua, la recull un amplificador connectat a un oscil·loscopi digital o a un mòdul de digitalització. Es recorda que normalment és necessari amplificar aquest senyal perquè sol tenir una magnitud molt petita.

Alhora que es fa la mesura de  $B$  s'ha de conèixer la força magnètica. Això es pot fer, en el cas que es pugui obtenir  $H$  coneixent la magnitud del corrent de magnetització, a través d'una resistència la caiguda de tensió de la qual és proporcional a aquest corrent.

Es connecten els seus terminals a un amplificador del mateix tipus (encara que guany diferent) del que s'ha fet servir per a amplificar  $dB/dt$ <sup>11</sup> i el senyal es passa al mòdul de digitalització [3]. Pot ser possible que  $H$  s'hagi de mesurar a través d'una bobina o d'algun altre dispositiu; i per tant el senyal que s'hauria de digitalitzar seria el voltatge de sortida d'aquest dispositiu en comptes del de la resistència.

Amb els dos senyals digitalitzats, el següent pas és guardar-los a un PC i realitzar totes aquelles operacions numèriques necessàries per a obtenir la corba d'histèresi (integració, compensació del flux de l'aire si no s'ha implementat al circuit, etc.), així com la comparació entre  $dB/dt$  real i el desitjat. El PC actua llavors sobre el generador de funcions canviant el senyal d'entrada i el corrent de magnetització. El procés s'itera les vegades que faci falta fins que el comportament de  $B(t)$  sigui el desitjat.

## 4.5 Comparació dels models de permeàmetres existents

En aquest apartat es presenten dues taules comparatives de permeàmetres. Al capítol 2 del document d'annexos se'n descriu de forma detallada l'estructura i el principi de funcionament de cada un i se'n llisten els avantatges i desavantatges.

La taula (4.1) és una breu descripció física de cada permeàmetre, un resum del que es pot trobar a l'apartat 2 als annexos.

La segona, la taula (4.2), és una comparació del rang de força magnètica en què pot operar cada dispositiu. És una dada interessant, perquè es recorda que el permeàmetre dissenyat ha de poder mesurar satisfactòriament materials ferromagnètics tous i per tant treballarà amb valors d' $H$  força petits<sup>12</sup>.

S'han inclòs dos permeàmetres més que els explicats a l'apartat 2 dels annexos; es tracta de dos models antics, el permeàmetre de doble barra d'Ewing i el permeàmetre Iliovici. Per altra banda, no s'han tornat a escriure els avantatges i els desavantatges de cada un perquè s'han llistat a l'apartat anterior. A la taula (4.2) es pot observar que falten els rangs d'alguns permeàmetres. Aquest fet es deu a que ja no es fan servir i per tant no apareixen als estàndards.

<sup>11</sup>Això es fa per a aconseguir més exactitud en els resultats, ja que per les característiques d'aquests dispositius diferents tipus podrien introduir diferents desplaçaments de fase.

<sup>12</sup>Cal tenir en compte que els rangs de la taula limiten l'ús de cada permeàmetre per sobre del valor més alt d' $H$  descrit; no obstant això, és possible sotmetre la mostra a forces magnètiques de magnitud més petita que la mínima, tot i que perdent precisió.



	Estructura del circuit magnètic	Mesura d'H	B-coil	Bobina de magnetització	Bobines de compensació	Principi
<b>Hopkinson</b>	Doble yoke que envolta completament la mostra.	A partir del corrent de magnetització.	Envolta el centre de la mostra.	Envolta la mostra.	No.	Les mesures són acurades en tant que el contacte entre la mostra i el yoke sigui bo.
<b>Ewing doble barra</b>	Doble barra i doble yoke. Els jous són mòbils.	A partir del corrent de magnetització.	Cada barra està envoltada per dos parells de bobines de B.	4 en total. La llargada de dues (I1) és la meitat de la llargada de les altres dues (I2).	No.	Es fan mesures a cada llargada (I1 i I2) i s'assumeix que la reluctància del jou i les juntures és la mateixa per les dues configuracions, de tal manera que es pot eliminar del càlcul.
<b>Illovi</b>	Yoke en forma d'U.	A partir del corrent de magnetització. Alternativament, amb una bobina H.	Envolta la mostra.	Envolta la mostra.	Sí. Envolten els yokes.	Les bobines de compensació aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux.
<b>Burrows</b>	Doble barra i doble yoke. Cantonades arrodonides.	A partir del corrent de magnetització.	Mostra: n'hi ha dues; una serveix per a fer la correcció del flux de l'aire. Barra auxiliar: n'hi ha una. Situada a certa distància del yoke.	Envolta la barra auxiliar i la mostra.	Sí. 4 bobines connectades en sèrie i col·locades a les juntures dels yokes amb les mostres.	Les bobines de compensació aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux.
<b>Fahy Simplex</b>	Yoke en forma d'U. La mostra està subjectada entre el jou i uns blocs ferro tou.	Bobina H situada entre dos blocs de ferro tou que transfereixen els extrems de la bobina als de la mostra. Envolta una forma no magnètica.	Envolta tota la llargada magnètica de la mostra.	Envolta el yoke.	No.	B i H es mesuren amb bobines, així que no fa falta compensació. S'obtenen els valors amitjanats per a tota la llargada de la mostra.
<b>MH</b>	Doble yoke en forma d'U (estructura simètrica).	Bobina H rotativa (180°), constituïda per dues bobines H planes.	Envolta una llargada curta del centre de la mostra. També compta amb una bobina per a la correcció del flux de l'aire.	Envolta la totalitat de la mostra.	Sí. 4 bobines connectades en sèrie i col·locades a les juntures dels yokes amb les mostres.	Les bobines de compensació aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux. La bobina H rotativa permet obtenir valors més exactes d'H.
<b>High-H</b>	Doble yoke en forma d'U (estructura simètrica).	Bobina H rotativa (180°), constituïda per dues bobines H planes.	Envolta una llargada curta del centre de la mostra. També compta amb una bobina per a la correcció del flux de l'aire.	Envolta les extensions polars que subjecten la mostra, de llargada reduïda.	Sí. Envolten els yokes.	Les bobines de compensació aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux. La bobina H rotativa permet obtenir valors més exactes d'H. Les extensions polars permeten l'ús de mostres curtes o aplicar forces magnètiques més grans.
<b>NPL</b>	Doble yoke en forma d'U (estructura simètrica). Ús d'extensions polars intercanviables.	Dues bobines planes esracionàries situades molt a prop de la mostra.	Envolta una llargada el centre de la mostra. Dues bobines secundàries serveixen per a verificar la uniformitat del flux a la regió. Correcció del flux de l'aire.	Envolta la totalitat de la mostra.	Sí. Partida en dos i situada a les juntures de la mostra amb el yoke.	Les bobines de compensació aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux. S'assegura la uniformitat del flux amb bobines secundàries.
<b>IEC tipus A</b>	Doble yoke en forma d'U (estructura simètrica).	Dues bobines planes esracionàries situades molt a prop de la mostra. Alternativament, un sensor d'efecte Hall.	Envolta el centre de la mostra. Correcció del flux de l'aire.	Envolta la totalitat de la mostra.	Per defecte, no. Se'n poden col·locar al voltant del yoke.	Les bobines de compensació, si n'hi ha, aporten la fmm necessària perquè no hi hagi pèrdues de flux.
<b>IEC tipus B</b>	Doble yoke en forma d'U (estructura simètrica). Ús d'extensions polars.	Dues bobines planes esracionàries situades molt a prop de la mostra. Alternativament, un sensor d'efecte Hall o una bobina de Rogowski-Chattock.	Envolta el centre de la mostra. Correcció del flux de l'aire.	Envolta les extensions polars que subjecten la mostra.	No.	B i H es mesuren amb bobines, així que no fa falta compensació.

Taula 4.1: Taula de comparació dels diferents tipus de permeàmetre més rellevants.

Rang d'operació (força magnètica) en kA/m	
Iliovici	0.4-400
Burrows	0.008-24
Fahy Simplex	0.008-24
MH	0.008-24
High-H	8-400
NPL	0.04-200
IEC tipus A	0.008-200
IEC tipus B	0.008-50

Taula 4.2: *Taula de comparació dels rangs d'operació de força magnètica dels permeàmetre més rellevants.*

# Capítol 5

## Metodologia

En aquest capítol es descriu el procediment seguit per tal de dissenyar el permeàmetre, des de les simulacions amb Opera fins al dimensionament de l'electrònica per a fer-lo funcionar i prendre mesures. En cada un dels subapartats s'explica detalladament una tasca fonamental en el procés de disseny, així com el mètode seguit per arribar a un conjunt de resultats.

### 5.1 Avaluació de totes les alternatives i eliminació de les menys adequades

En aquest punt es fa un anàlisi teòric del problema a partir de la informació recopilada amb l'objectiu de descartar algunes variables de disseny no desitjades. Es tracta d'un procés estrictament necessari perquè elimina moltes combinacions possibles que per falta de temps no podrien provar-se per mitjà de simulacions. Per dur a terme aquest anàlisi s'ha adoptat una estratègia que consisteix en relacionar els objectius tècnics amb el grau d'adequació de cada variable a aquests.

Aquest procés suposa una tasca complicada, perquè hi intervenen moltes variables i algunes són incompatibles entre elles. També és possible combinar diferents elements de diferents permeàmetres per a obtenir-ne un de més adequat. Per això s'ha elaborat una taula en què s'exposen les variables generals d'un permeàmetre (assenyalades amb números) i quines configuracions poden adoptar (associades a una lletra). Quasi cada una d'aquestes configuracions afavoreix o entra en conflicte amb el compliment d'algun dels objectius. Com que són en part aquestes relacions el que determina l'estratègia de disseny del per-

Codi	Objectius	Prioritat
<b>Relacionats amb els requeriments del problema</b>		
O1	El permeàmetre ha de permetre mesurar mostres rectangulars d'una llargada d'uns 20-25 cm i d'uns 3-6 mm de gruix.	1
O2	El permeàmetre ha de poder treballar amb mostres de materials ferromagnètics tous.	1
O3	Aconseguir que el permeàmetre sigui capaç de mesurar amb precisió la densitat de flux del camp magnètic i el camp aplicat.	1
O4	Facilitar l'execució simple, ràpida i efectiva del procés de mesura.	1
O5	Afavorir la simplicitat de la mecànica i l'electrònica del disseny.	3
O6	Aportar un disseny compacte i resistent i que s'adapti bé a les condicions de treball del laboratori. No es treballa sota requeriments industrials.	3
O7	Dissenyar el circuit secundari de manera que sigui compatible amb la instrumentació del laboratori (fonts de tensió i de corrent, sensors, etc.).	1
O8	Reduir el sobrecost del permeàmetre.	3
<b>Relacionats amb les condicions de treball d'un permeàmetre</b>		
O11	Reduir l'impacte de les pèrdues de flux del circuit magnètic als resultats experimentals.	1
O12	Aconseguir un disseny del circuit magnètic que afavoreixi la uniformitat de B i H a la mostra.	1
O13	Capacitat del permeàmetre d'operar en un rang força ampli d'H.	1
O14	Reduir al màxim els efectes de les pèrdues dinàmiques.	1

Taula 5.1: *Enumeració dels objectius i avaluació de la seva prioritat (1 és la més alta i 4 la més baixa).*

meàmetre, a la taula s'indiquen els objectius que tenen a veure amb cada configuració i com s'hi veuen afectats. Tot això s'ha determinat a partir de la descripció de les parts d'un permeàmetre i sobretot dels avantatges i els desavantatges de cada tipus, que han permès identificar els punts febles de cada permeàmetre i quin és l'element que els causa.

Alguns objectius (o grups d'objectius) són més prioritaris que d'altres. A la taula (5.2) aquesta importància no es veu reflectida; de totes maneres, coneixent la prioritat de cada objectiu a partir de la taula (5.1), es pot intuir immediatament quines configuracions són més crítiques. S'ha considerat que és millor discutir-ho més a fons per escrit a causa de la dificultat de plasmar-ho en una altra taula.

A la taula (5.1) es pot consultar el codi de cada objectiu i la seva prioritat (on 1 és la més

alta i 4 la més baixa).

Aquelles configuracions amb impacte negatiu en el compliment dels objectius que es considera incert (és a dir, que el seu efecte es podria contrarrestar prenent certes mesures de disseny) es marquen amb un asterisc.

A partir de la taula (5.2), s'ha conclòs que es descarten immediatament les següents alternatives<sup>1</sup>:

- Configuració de doble *yoke* i doble barra (1a). S'ha descartat per les següents raons:
  - Es necessiten dues barres molt similars, una d'ella de propietats *conegudes*. Relacionada amb O5 i O8.
  - El temps de presa de mesures és molt llarg i el procés molt tediós. Relacionada amb O4.
  - Entra en conflicte amb els objectius O4 i O11\* i O12, tots amb una prioritat igual o més alta que 2.
- *Yoke* massís (2a). S'ha descartat perquè afavoreix l'aparició de corrents de Foucalt. Relacionat amb O14.
- Vores amb angles rectes (3b). S'ha descartat perquè afavoreix l'aparició d'efectes de vora i la no-uniformitat del flux. Relacionat amb O11.
- Bobina B enrotllada directament sobre la mostra (6a). S'ha descartat perquè fa molt lenta l'operació d'inserció de la mostra al permeàmetre, i cada cop que es fa s'ha de bobinar de nou. Relacionat amb O4.
- Compensació de la contribució del flux a l'aire nul·la (8c). S'ha descartat per les següents raons:
  - És incompatible amb (6b).
  - Entra en conflicte amb 03 i O11, dos objectius de la prioritat més alta.
- Bobina rotatòria (9e). S'ha descartat perquè representa una complicació de disseny i un cost innecessaris davant d'altres mètodes de mesura d'*H*. Relacionat amb O6 i O10.

---

<sup>1</sup>S'enumeren els objectius amb què entren en conflicte i també els aclariments que es creuen necessaris per a justificar-ho.

- Ús de bobines de compensació. Finalment s'ha descartat perquè fa més difícil el procés de prendre mesures, complica i recarrega excessivament el circuit magnètic i pot suposar un sobrecost, ja que implica utilitzar més fonts de corrent. Relacionat amb O4, O5 i O8.

A continuació es llisten aquelles configuracions que són un interrogant; és a dir, que o presenten desavantatges importants però poden arribar a ser imprescindibles o que es desconeix quin efecte tindran en el sistema, i per tant no se'n pot fer una bona valoració inicial. Això fa que no es puguin descartar i presenten la possibilitat de ser estudiades en l'execució del projecte.

- Bobina de Rogowski-Chattock (9b). És un dispositiu car i per tant es podria incomplir O8\*, però segons el disseny pot ser la millor opció a nivell de precisió.
- Mesura d' $H$  a partir del corrent de magnetització (9a). Es pot recórrer a aquest mètode només com a verificació de la mesura presa amb un dispositiu d' $H$ . Tot i així, es vol comprovar mitjançant simulacions l'inviabilitat d'aquest càlcul. Es desconsella per les següents raons:
  - El tipus de permeàmetre que funciona amb aquest principi ha quedat obsolet perquè requereix una compensació molt acurada que complica excessivament el procés de prendre mesures. Relacionat amb O4\*. A més, s'ha decidit que no es vol fer servir bobinat de compensació.
  - No es pot tenir la seguretat que el resultat sigui precís per la incertesa amb la longitud magnètica. Relacionat amb O3\*.

Codi	Solucions	Observacions	Afavoreix:	Entra en conflicte amb:
<b>1 Configuracions del yoke</b>				
a	Asimètric en forma d'U		O4, O5, O6	O11*, O12*
b	Doble yoke i doble barra	Aquesta configuració ja no s'adopta		O4, O11*, O12*
c	Doble yoke en forma de C		O11, O12, O14	O4, O5*
<b>2 Composició del yoke</b>				
a	Massís (ferro tou, acers de baix contingut en carboni)			O14
b	Laminat (Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co)		O14	
<b>3 Forma del yoke</b>				
a	Vores arrodonides		O11, O12	
b	Vores amb angles rectes			O11, O12
c	Secció circular		O11, O12	
d	Secció rectangular		O11, O12	O11*
<b>4 Ús d'extensions polars</b>				
a	Sí	Poden ser de diferents formes		O11*, O12*
b	No		O10	
<b>5 Bobina de magnetització</b>				
a	Envolta la totalitat de la mostra (i la barra auxiliar si n'hi ha)			O4
b	Envolta el/s yoke/s o les extensions polars		O4	O11*
<b>6 Forma de la bobina B</b>				
a	Enrotllada directament sobre la mostra			O4
b	Enrotllada a una forma no magnètica	Requereix de compensació del flux de l'aire	O4	
<b>7 Situació de la bobina B</b>				
a	Envolta tota la llarga de la mostra		O3	
b	Envolta només una fracció de la mostra (el centre)	No proporciona les propietats magnètiques mitjanes al llarg de la mostra		O3*
<b>8 Compensació de la contribució del flux de l'aire</b>				
a	Numèrica	Pot complicar lleugerament el processat de les mesures	O3, O11	
b	Amb bobines (automàtica)		O3, O11	O10*
c	No			O3, O11
<b>9 Mètodes de mesura d'H</b>				
a	A partir del corrent de magnetització	Requereix de bobines de compensació	O6	O3*, O4*, O11
b	Bobina de Rogowski-Chattock		O3, O11	O8*
c	Bobina H (com en el permeàmetre Fahy Simplex)		O3, O11	
d	Dues bobines H planes		O3, O11	
e	Bobina rotatòria (180°)		O3, O11	O5, O8
f	Sensor d'efecte Hall		O3, O11	
<b>10 Ús de bobines de compensació</b>				
a	Sí		O3, O11	O4, O5, O8
b	No		O4, O5, O8	O3*, O11*
<b>11 Número de bobines de compensació</b>				
a	1	Poden ser 2 o 4 bobines connectades en sèrie	O4, O5	
b	2 o 4	S'ajusta el corrent de manera individual per a cada bobina		O5, O6
<b>12 Ajustament del corrent de compensació per a cada punt</b>				
a	Sí		O11	O4
b	No		O4	O11*
<b>13 Situació de les bobines de compensació</b>				
a	Sobre les juntures (les parts delicades del circuit)		O11	
b	Directament sobre el yoke		O11	

Taula 5.2: Possibles solucions per a cada variable i els objectius que afavoreixen i que dificulten (amb el codi de l'objectiu).

### 5.1.1 Elecció del mètode de mesura en CC

L'elecció del mètode per traçar la corba d'histèresi és tan concreta i està tan deslligada de les variables que s'han enumerat fins ara que s'ha de tractar en un altre apartat.

Es considera que el millor mètode per a aquesta aplicació en concret és el ballístic. Es farà servir en conjunt amb dues fonts bipolar programables de què disposa el laboratori de mesures magnètiques (FAST-PS 3020-600 de CAENels) amb l'ànim d'automatitzar la major part del procediment d'obtenció de la corba d'histèresi. Les raons per les quals s'ha escollit aquest mètode són les següents:

- Ja es disposa d'instrumentació potent al laboratori per a l'execució d'aquest mètode. Relacionat positivament amb O7.
- Com s'ha explicat a l'apartat 4.4.1, el mètode ballístic és el més adequat quan es vol obtenir la corba normal de magnetització i la corba d'histèresi d'un material. Posat que no es volen conèixer característiques magnètiques més enllà de les mencionades, l'ús d'aquest mètode no suposa cap pèrdua d'informació desitjada.
- És el millor mètode per trobar les propietats magnètiques d'espècimens de cert gruix. Quan s'han descrit les pèrdues per corrents de Foucault s'ha pogut comprovar que, en efecte, el gruix juga un paper molt important en la importància d'aquest tipus de pèrdues. El mètode continu implica una problemàtica relacionada amb els corrents paràsits que es resol amb períodes de magnetització molt grans i que deriva en errors importants en la sensòrica implicada, cosa que obliga a utilitzar un control per a corregir-lo força complicat. En canvi, mètode ballístic té una constant de temps associada prou petita per a negligir els problemes relatius a la deriva del fluxímetre [3]. Així, el mètode ballístic és llarg, però senzill i precís. Relacionat positivament amb O3 i O14.

### 5.1.2 Elecció de l'alternativa més adequada: primera aproximació de disseny

L'elecció de l'alternativa més adequada és un procés que presenta certa complexitat. S'ha de tenir en compte que només es coneixen els avantatges i desavantatges d'algunes configuracions en concret perquè diversos autors els han pogut comprovar experimentalment per un conjunt de variables. Si canvien les variables, encara que no siguin totes, canvien també els resultats i les comprovacions poden no ser vàlides. Aquest problema es veu agreujat per la impossibilitat de calcular numèricament el valor que haurien de prendre moltes



d'aquestes variables per tal d'obtenir la millor solució possible. En resum, el disseny d'un permeàmetre es basa en part en un procés de prova i error.

Com ja s'ha comentat, en l'actualitat els programes d'anàlisi d'elements finits són prou potents per poder predir amb certa acuracitat com es comportarà un permeàmetre un cop fabricat, tot i que en cap cas es pot conèixer exactament la seva resposta davant d'inhomogeneïtats o d'altres fenòmens que puguin afectar-lo. Tot i així, els programes com Opera o Ansys són l'únic mitjà, si s'exclouen els experiments sobre prototipis (que són cars i irrealitzables en aquestes circumstàncies), per a conèixer del cert el comportament d'un permeàmetre. En definitiva, és impossible acabar de definir com serà el permeàmetre que es dissenyarà durant la fase prèvia al disseny perquè l'única manera de fer-ho és provant configuracions i geometries diferents.

Per això es considera poc útil definir diverses solucions concretes a partir de la combinació de variables de les taules anteriors. El que sí que es pot fer amb aquestes dades és establir un punt d'inici. Per això s'ha escollit un conjunt de solucions, però no només en funció de com compleixen amb els objectius (que permeten imposar un criteri de selecció més aviat poc concret), sinó tenint també en compte el joc que pot donar en la fase de disseny.

La solució que es proposa és la següent. Es considera que és millor una configuració de *yoke* únic pels següents motius:

- Utilitza la meitat de material que si es treballa amb un doble *yoke* simètric, i per tant és més viable econòmicament i ambiental.
- El contacte entre la mostra i el nucli és més directe. Això és important si es té en compte que la barra pot no ésser recta del tot i presentar certa corbatura. Si es fan servir dos *yokes*, el més probable és que en aquest cas el contacte entre totes les peces sigui insuficient, i que en comptes de beneficiar la uniformitat del flux a la mostra provoqui pèrdues. Utilitzant els mètodes de fixació adequats i la barra ben orientada es pot evitar bona part de les pèrdues de flux.
- Millora la flexibilitat, ja que l'introducció i fixació de mostres es fa més fàcil i més directa.

Que el *yoke* tingui secció circular i forma d'arc presenta un seguit d'avantatges i d'inconvenients. Tenint en compte el que s'ha explicat anteriorment, és evident que afavorirà la uniformitat del flux perquè aquesta geometria minimitza notablement els efectes de vora. No només això, sinó que el flux prendrà una direcció més natural quan circuli pel nucli. El principal problema que presenta aquesta geometria és la seva producció. Requereix

una quantitat de material més gran del que sembla, perquè la manera de fer-ho és agafant dues peces extrems de cilindres. En aquest punt del projecte, encara s'ha d'estudiar la seva viabilitat de fabricació a partir d'acer laminat.

La bobina de magnetització envolta el *yoke* en comptes de la mostra. El motiu principal d'aquesta elecció és que per mesurar B i H a la barra és més adequat que aquesta estigui lliure de bobines de magnetització. Per altra banda, pot arribar a ser complicat aplicar camps magnètics de magnituds petites magnetitzant directament la mostra.

El material del *yoke* és ARMCO. Aquesta elecció és interessant pels següents motius:

- És barat i fàcil d'aconseguir.
- És senzill de mecanitzar.
- A ALBA es treballa molt amb aquest material i el tenen molt ben caracteritzat.
- Presenta una permeabilitat en la zona lineal molt elevada.

Es presenta també un model de permeàmetre alternatiu de geometria simètrica amb l'ànim de comparar-lo amb la solució proposada en aquest apartat. Un cop s'hagi perfeccionat el circuit del permeàmetre asimètric s'han de fer les simulacions pertinents amb el simètric. Perquè la comparació dels resultats sigui vàlida, les característiques del circuit magnètic han de ser, exceptuant la simetria del nucli, les mateixes en ambdós dissenys.

### 5.1.3 Algorisme de disseny

Es creu important escriure quin ha estat el procés de disseny i els propers passos a fer. Aquest apartat està relacionat amb l'anterior, perquè es parteix del disseny explicat, que s'ha anat evaluant en cada pas del procés i ha anat rebent modificacions. L'objectiu últim d'aquest procés és trobar el millor disseny de permeàmetre possible, és a dir, el que compleixi millor els objectius. S'ha elaborat un algorisme que el representa esquemàticament i que es mostra a la figura (5.1). La taula (5.3) complementa aquesta figura.

<b>Taula 1: Efectes indesitjats per defectes de disseny</b>
<b>El rang de mesura és insuficient</b>
<b>S'experimenten efectes no desitjats degut a la saturació dels materials</b>
<b>La densitat del corrent de magnetització requerit és massa petita/gran</b>
<b>B i H no uniformes en una llargada acceptable a la mostra</b>

Taula 5.3: *Efectes no desitjats detectats amb OPERA deguts a defectes de disseny. Complementa la figura (5.1)*

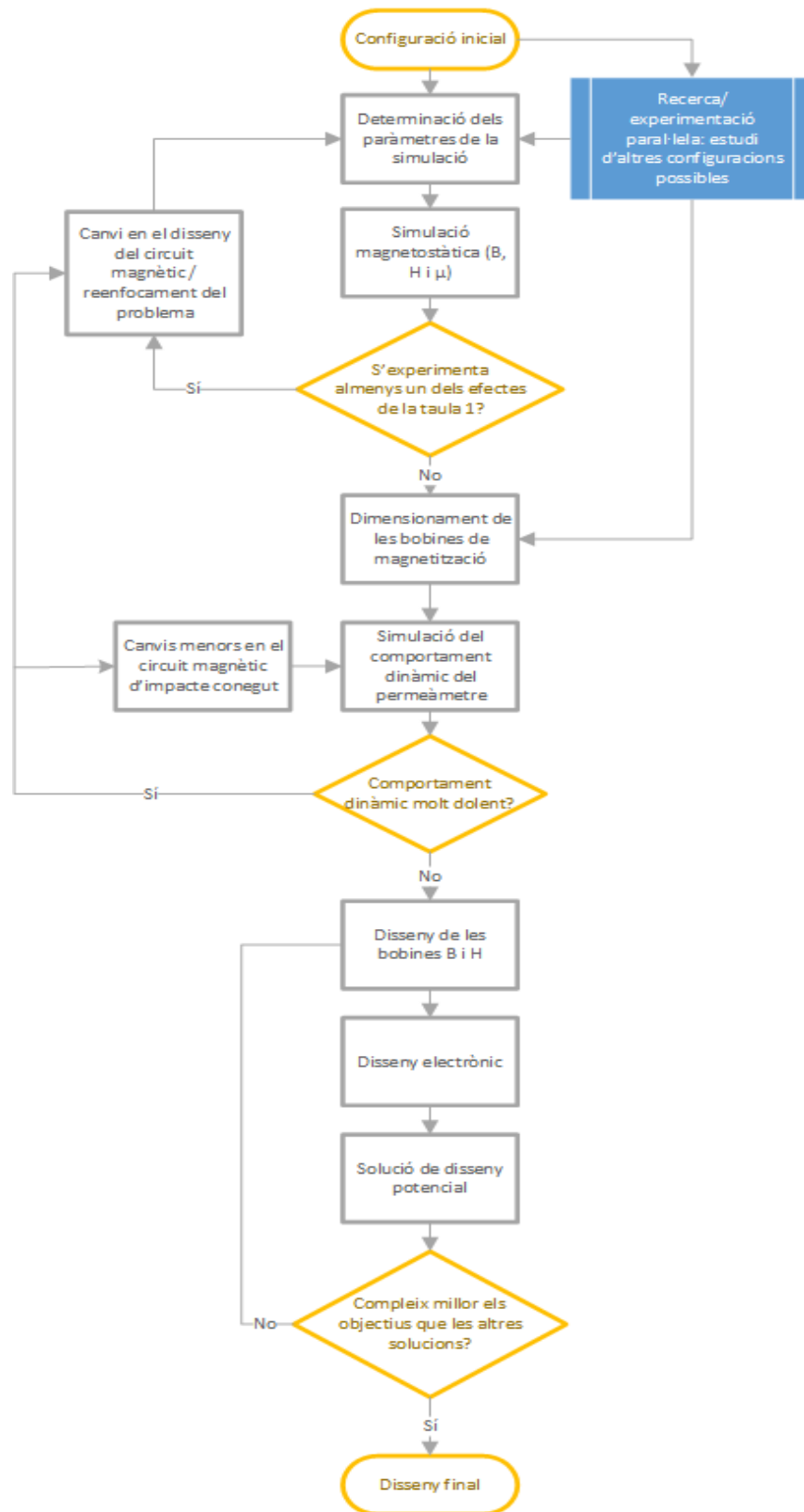


Figura 5.1: Cronograma de l'algorisme de disseny.

## 5.2 Anàlisi magnetoestàtic

En aquest apartat es presenta la metodologia seguida per realitzar l'anàlisi magnetoestàtic del permeàmetre en 3D amb el programa Opera.

### 5.2.1 Introducció a Opera

L'anàlisi magnetoestàtic és la principal eina de disseny del circuit magnètic del permeàmetre presentat. Amb aquest tipus d'anàlisi és possible determinar la distribució de la densitat de flux magnètic i de la intensitat de camp per a un valor concret de densitat de corrent a les bobines del circuit primari. Les simulacions en condicions magnetoestàtiques es duen a terme amb els següents objectius generals:

1. Dimensionar les bobines de magnetització.
2. Dimensionar el circuit magnètic.
3. Determinar la longitud de la mostra en què se situaran les bobines B i H.

Per tal de poder realitzar un anàlisi magnetoestàtic, a Opera se li han d'introduir els següents paràmetres:

- La geometria, les dimensions i la posició dels elements que formen el circuit magnètic.
- El material de tots els elements del circuit magnètic, caracteritzat per la seva corba BH en el cas de materials no lineals, com els ferromagnètics.
- El tipus de potencial dels elements del circuit magnètic i del *background* (*default*, *reduced* o *total*). Pels primers s'utilitza *total*, i pels segons *reduced*.
- Si els elements són lineals o quadràtics, de cara a l'ajust matemàtic dins de cada element de la malla.
- La geometria, les dimensions i la posició de tots els conductors del model. Poden tenir formes molt diverses, però en el cas d'aquest treball sempre són bobines de tipus *coil* o *racetrack*.
- El tipus de conductor (*Biot-Savart current source* o *circuit element*). En aquest cas sempre es fa servir el primer tipus, que és independent del mallat d'elements finits.
- La simetria del model i les condicions de contorn.
- El medi que envolta el circuit magnètic (o *background*). Per això cal crear un element, per exemple un ortoedre, el material del qual sigui aire i que envolti la totalitat dels

elements del model, inclosos els conductors. Com es pot intuir, aquest bloc també s'ha de mallar.

### Temps de simulació

Les simulacions amb Opera són molt lentes, perquè per avaluar  $B$  i  $H$  en el model el programa treballa amb un volum d'operacions molt alt. Com és el cas de tots els programes d'elements finits (FEM), com més fi el mallat més llarg és el temps de simulació. Alguns elements, concretament aquells de mida més petita o en què es vulgui conèixer amb més precisió el valor de  $B$  i  $H$ , han de tenir mallats molt fins. A la resta se'ls poden assignar (fins a cert grau) mallats menys fins. Per altra banda, Opera permet explotar la simetria del model per tal reduir el volum de càlculs a resoldre, assignant a la part del model que es conserva les condicions de contorn corresponents. Per exemple, el permeàmetre asimètric presenta simetria i només cal modelar-ne i calcular-ne la meitat.

Tot i prendre aquestes mesures, la majoria de vegades el temps de simulació segueix sent molt elevat a causa de la presència de bobines. Amb aquests elements no es pot fer ús simetria: tornant al cas del permeàmetre asimètric, encara que només calguin mig *yoke* i mitja mostra per representar el model, per fer la simulació Opera necessita conèixer la contribució al camp magnètic de totes les bobines.

### 5.2.2 Procés de disseny iteratiu

Opera permet fer rutines d'optimització mitjançant la definició de variables de disseny i la minimització d'una funció de cost, que fan que el procés d'iteració sigui automatitzat, estalviant temps i obtenint una millora en la precisió dels resultats. Malauradament, no s'ha pogut fer ús d'aquest camí perquè no es disposava de llicències d'Opera específiques per utilitzar d'aquesta eina. En conseqüència, el procés d'iteració ha estat manual, canviant a mà el valor de les variables: densitat de corrent, dimensions de la mostra, etc., i analitzant cada vegada un nou model.

Les simulacions de l'anàlisi magnetoestàtic estan dividides en *grups*, i cada grup està format per un o més *blocs*. Els grups engloben un conjunt de simulacions que responen a uns mateixos objectius específics i que comparteixen els mateixos trets generals. Els blocs són agrupacions d'experiments de diferents característiques que corresponen a una iteració. Un cop s'han obtingut i analitzat els resultats d'un bloc, i valorada l'adequació del model del permeàmetre que s'hi correspon al que es vol dissenyar, es poden caracteritzar el model i les simulacions del següent bloc.

### 5.2.3 Hipòtesis inicials

Són necessàries unes hipòtesis inicials que ajudin a acotar el problema. Algunes tenen a veure amb Opera i d'altres amb elements externs al circuit magnètic. Aquest apartat descriu quines són i com afecten a les simulacions i als seus resultats.

#### Limitació de la $fmm$

El rang de la  $fmm$  ve limitat pel producte  $S \cdot J$ , on  $S$  és la secció del fil i  $J$  la densitat de corrent que hi circula. Es tracta de la intensitat del corrent del curcuit primari i les seves unitats són els ampères.

El corrent màxim ve limitat pel *gauge* del fil, és a dir, per la seva secció. No es pot excedir el límit marcat en els fulls d'especificacions ja que a partir d'aquest valor els efectes de l'increment de la temperatura passen a ser significatius. Per altra banda, existeix un corrent mínim que pot proporcionar la font d'alimentació.

A l'apartat 5.2.9 es tracten aquests dos aspectes i es dimensiona el circuit de magnetització. Les densitats de corrent escollides per a les simulacions, i per tant el rang de la  $fmm$ , respecten tant la limitació del corrent màxim com del corrent mínim, afegint-hi un cert marge per tal d'evitar sobrecarregar el fil i assegurar l'estabilitat de la font.

#### Àrea de les bobines de magnetització

Amb Opera, les bobines no imiten amb exactitud el bobinat real. En comptes d'un fil que s'enrotlla  $N$  voltes al voltant del material, els conductors són estructures sòlides, amb forma d'anella i secció rectangular: són voltes individuals a les quals se'ls assigna una densitat de corrent concreta. El corrent que circula per un d'aquests conductors és igual a la seva secció per la densitat de corrent. La força magnetomotriu total es pot calcular com la suma del corrent de tots els conductors, o, el que és el mateix, com el nombre de conductors pel corrent que circula per cada un d'ells.

En realitat, l'essencial és que la força magnetomotriu total aportada sigui la mateixa en ambdós casos. Sempre i quan es respectin els corrents màxims i mínims que poden circular pel bobinat i la uniformitat del flux, es pot jugar amb el nombre de voltes, el nombre de capes i la secció del fil en el model físic a fi d'aconseguir aquesta equivalència entre el model simulat i el real.

Per aquest motiu, primer es dimensionen les bobines de magnetització segons les possibles geometries que ofereix Opera i després es fa un estudi de com han de ser en realitat.

## Materials laminats

Encara que el nucli del material real sigui laminat, en l'anàlisi magnetoestàtic amb Opera no és viable simular-lo d'aquesta manera. El mallat ha de ser molt fi a la capa aïllant entre les làmines, fet que incrementa de forma desorbitada el temps de simulació i fa tot el procés impracticable.

Per altra banda, els efectes associats a la laminació són, en condicions estàtiques, menyspreables si el *packing factor* s'apropa a 1, ja que la permeabilitat del material laminat és funció de la permeabilitat del material compacte i d'aquest factor, tal i com mostra la següent fórmula [23]:

$$\mu_{r\text{laminat}} = p \cdot \mu_r \quad (5.1)$$

L'anomenat *packing factor*,  $p$ , és el rati entre la massa real del material laminat i la massa que tindria si fos tot massís. En nuclis com el d'aquest permeàmetre pot prendre valors al voltant de 0.95.

Totes les simulacions i els càlculs d'aquest apartat es fan sense tenir en compte la laminació del nucli, ja que s'ha demostrat que l'afectació de substituir el material massís per un de laminat sobre el seu estat de magnetització és negligible.

### 5.2.4 Corbes BH de materials d'ALBA

El laboratori de mesures magnètiques d'ALBA treballa amb un gran ventall de materials ferromagnètics de diferents propietats, però la gran majoria entren a dins de la categoria de materials ferromagnètics tous. ALBA ha facilitat a l'estudiant les corbes de magnetització normals com a base per dur a terme les simulacions.

Com ja s'ha comentat, per tal de realitzar els experiments simulats amb Opera és necessari conèixer a priori la permeabilitat magnètica dels materials que formen el *yoke* i la barra. En aquest sentit, un primer pas és comprovar la coherència entre els punts de la corba teòrica i els de la corba simulada, per comprovar que no hi ha errors en aquest aspecte.

En aquest apartat es realitza un petit anàlisi de la forma de les corbes BH d'alguns materials que utilitza ALBA i que pot interessar caracteritzar amb el permeàmetre. Es defineixen també els rangs de la densitat de flux magnètic que s'han de mesurar per a cada material.

## Permendur i ARMCO®

El Permendur i l'ARMCO (ARMCO®) són dos materials ferromagnètics molt tous, i per tant són indicats per fabricar el *yoke*.

El Permendur és un dels materials amb què més es treballa a les línies de llum d'ALBA. En la zona lineal de la seva corba de magnetització té una permeabilitat magnètica relativa molt alta, d'aproximadament 10722.

L'ARMCO, si bé la seva permeabilitat relativa màxima en la zona lineal és d'uns 7500, per la qual cosa és una mica més difícil de magnetitzar que el Permendur, té altres característiques discutides a l'apartat (5.1.2) que el fan ideal per constituir el nucli del permeàmetre.

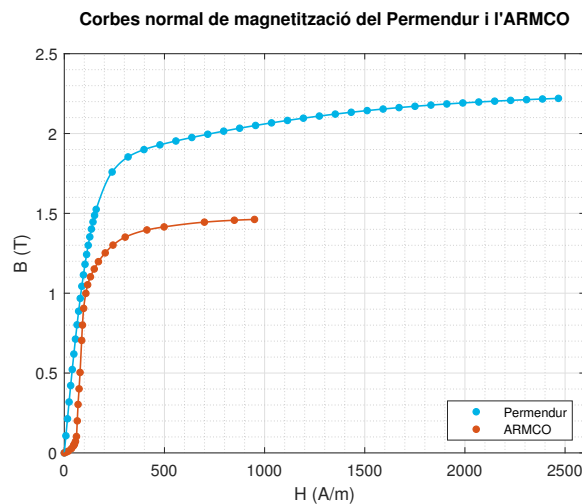


Figura 5.2: *Corbes de magnetització normals del Permendur i de l'ARMCO.*

S'observa pels primers punts de l'ARMCO una certa resistència a la polarització, que es tradueix en una corba de pendent creixent fins a la zona lineal. En realitat aquest comportament és comú a la majoria de materials ferromagnètics, i el fet que no es trobi al Permendur pot ésser per la baixa densitat de punts mesurats a camps baixos. No és prioritari caracteritzar aquesta zona amb massa detall.

Analitzant les corbes de magnetització d'ambdós materials s'ha vist que el pendent no tendeix a  $\mu_0$ , cosa que vol dir que el material no està saturat al 100%. En concret, el pendent per a la recta de tendència dels últims 7 punts de la corba del Permendur és de 47.65 vegades  $\mu_0$ , i el pendent per a la recta dels últims 2 punts de l'ARMCO és 39.91 vegades  $\mu_0$ .



Això vol dir que quan es va obtenir aquesta corba BH no es va arribar a la saturació total del material; de fet, en realitat no és necessari arribar fins a tals extrems, ja que en aquests punts el creixement de  $B$  per variacions importants d' $H$  és molt petit. Entre 2 T i 2.5 T el material ja està prou saturat perquè es pugui traçar la seva corba d'histèresi sense pèrdua de funcionalitat.

La conductivitat elèctrica és un paràmetre que influeix molt en la presència de corrents de Foucault. Les d'aquests dos materials són les següents:

- Permendur:  $\sigma_{Permendur} \approx 2.5 \cdot 10^6$  S/m
- ARMCO:  $\sigma_{ARMCO} \approx 2.5 \cdot 10^6$  S/m

Coneixent la corba, els rangs de densitat de flux magnètic que el permeàmetre ha de poder cobrir per cada material són, a grans trets, els següents:

- Permendur: 0.05-2.22 T. El mateix en negatiu.
- ARMCO: 0.05-1.46 T. El mateix en negatiu.

### M270-50

El comportament magnètic d'aquest material el situa a mig camí entre el Permendur i l'ARMCO i el M1200-100. A la figura (5.3) es mostra la seva corba de magnetització normal.

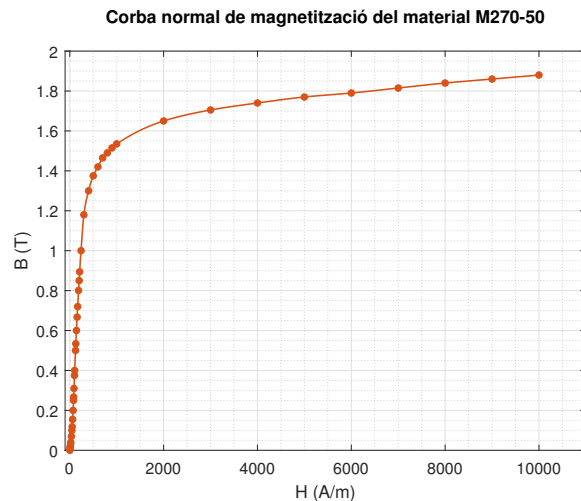


Figura 5.3: Corba de magnetització normal de l'M270-50.

La conductivitat elèctrica d'aquest material és de  $\sigma_{M270-50} \approx 4.510^6$  S/m.

El rang de  $B$  que s'ha de mesurar és de 0.05-1.8 T, i el mateix en negatiu.

## M1200-100

El material M1200-100 és d'ús habitual a ALBA, perquè es fa servir per als quadripols situats al llarg del túnel d'acceleració. Per aquest motiu existeix un gran interès a caracteritzar-lo. La seva corba de magnetització normal es pot veure a la figura (5.4).

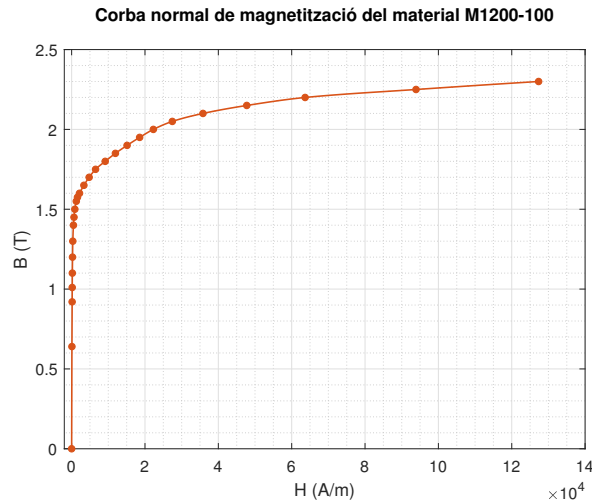


Figura 5.4: Corba de magnetització normal de l'M1200-100.

La seva conductivitat magnètica és com la de l'AMRCO:  $\sigma_{M1200-100} \approx 5 \cdot 10^6$  S/m.

En presentar un comportament ferromagnètic no tan tou com la resta de materials, el rang de  $B$  mesurat no pot ser tan ampli, ja que llavors no es podrien mesurar camps petits. S'ha estipulat que la densitat de flux magnètic màxima ha de sobrepassar els 2 T, i per tant s'ha definit un rang de 0.05-2.01 T, i el mateix en negatiu.

### 5.2.5 Càlcul d'H teòric a partir del corrent de magnetització

Amb l'objectiu d'intentar estalviar la bobina inductiva per mesurar la intensitat de camp  $H$  a la mostra, en aquest apartat s'ha intentat trobar una relació funcional entre  $H$  teòrica i  $H$  simulada.

En aquest sentit, es realitzen els càlculs per trobar la relació entre la intensitat de camp  $H$  al centre de la mostra (el punt de referència a la majoria de simulacions, com es pot veure als propers apartats) i la  $H$  teòrica calculada a partir del corrent total aplicat.

Si el material del *yoke* i de la mostra són el mateix, es pot aplicar fàcilment la llei d'Ampère:

$$H_m = \frac{NI}{L_m} \quad (5.2)$$

on  $L_m$  és la longitud del camí magnètic de la mostra. En aquest cas no es pot conèixer amb precisió, però es pot estimar que coincideix amb el diàmetre mig del *yoke*.

Quan el material del *yoke* i de la barra no són iguals, llavors calcular  $H$  teòric a la mostra és més complicat, i caldria, de fet, recórrer al valor simulat de  $B$  mitjà al *yoke*. Això representa un problema obvi, ja que impossibilita trobar la força magnètica amb un càlcul independent dels resultats experimentals i, per tant, no admet una comparació real entre ambdós valors. Per trobar  $H$  teòric es parteix de la llei d'Ampère i es procedeix de la següent manera:

$$\oint H \, dl = \int_{yoke} H \, dl + \int_{mostra} H \, dl = NI \quad (5.3)$$

Ja que el circuit magnètic està conformat pel *yoke* amb la forma de la meitat d'un toroide i de la mostra. I per tant:

$$\int_0^\pi H \, dl + \int_0^{L_m} H \, dl = \frac{B_y}{\mu_y} \cdot \pi R + H_m \cdot L_m = NI \quad (5.4)$$

On  $B_y$  és la densitat de flux magnètic al *yoke*,  $R$  és el radi del *yoke* i  $L_m$  és la longitud del camí magnètic de la barra. Aïllant i aplicant  $\mu_y = \mu_{ry} \mu_0$  es pot calcular  $H_m$  com es mostra a continuació:

$$H_m = \frac{N \cdot I - \frac{\pi R \cdot B_y}{\mu_{ry} \cdot \mu_0}}{L_m} \quad (5.5)$$

Per altra banda, aquestes fórmules suposen que  $H$  és uniforme al llarg de la mostra, cosa que no serà mai certa sense comptar amb bobinat de compensació.

L'equació anterior confirma el que ja s'ha discutit en anteriors apartats: no és una opció vàlida, ja que no es pot verificar que la relació entre ambdós valors sigui la calculada. Per tant, el permeàmetre no pot prescindir de la bobina H.

Per aquests motius es considera innecessari estudiar més a fons aquest aspecte amb l'ajuda de simulacions. En canvi, sí que cal avaluar la uniformitat de la intensitat de camp a la mostra per determinar com ha de ser la bobina H.

## 5.2.6 Primer grup d'experiments: model inicial del permeàmetre

Per a les primeres iteracions del disseny del permeàmetre s'han tingut en compte tots els conceptes explicats fins aquest punt, juntament amb les conclusions de la secció 5.1.2, el disseny plantejat en el qual es fa servir com a base de les simulacions d'aquest apartat.

L'objectiu és experimentar amb diferents variables de disseny per tal d'obtenir un seguit de resultats que puguin ser d'utilitat per a l'elaboració de models de permeàmetre més perfeccionats.

### Objectius dels experiments

En concret, amb els primers experiments es pretenen abordar i aclarir les següents qüestions, relacionades amb els objectius llistats a l'inici de l'apartat 5.2:

- El rang de mesura segons la configuració de les bobines de magnetització, el material dels elements del circuit magnètic, i la llargada i el gruix de la mostra.
- L'estat magnètic de la mostra i del *yoke* per diferents *fmm*.
- La influència de la llargada i el gruix de la mostra en les pèrdues de flux.

Per a cada simulació s'han avaluat:

- La densitat de flux magnètic i la força magnètica mínimes al *yoke*, ambdues situades als extrems del nucli.
- La densitat de flux magnètic i la força magnètica màximes al *yoke*, ambdues situades al punt mig del perímetre del nucli.
- La densitat de flux magnètic i la força magnètica al centre de la mostra.

### Característiques del model

A la figura (5.5) s'observa un esquema general del model simulat.

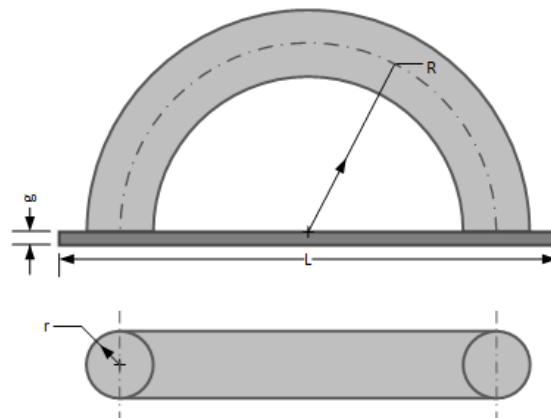


Figura 5.5: Esquema del permeàmetre per a les primeres iteracions. A la imatge superior se'n mostra la vista en planta, i a la imatge superior la vista frontal del nucli. Referència la taula 5.4

A la taula (5.4) es poden consultar les característiques dels experiments. Com es pot comprovar, al llarg de les simulacions alguns dels paràmetres es deixen constants i els altres es canvien. Es discuteixen a continuació.

Núm. sim.	Característiques de la simulació					
	Bobines de magnetització		Yoke	Mostra		
	fmm <sub>min</sub> [A·volta]	fmm <sub>max</sub> [A·volta]	Material	Material	Gruix (g) [mm]	Llargada (L) [mm]
1	12.7	1016	Permendur	Permendur	3	240
2	13	520	Permendur	Permendur	3	240
3	13	520	Iron	Permendur	3	240
4	3.175	253	Permendur	Permendur	3	240
5	3.175	253	Permendur	Permendur	6	240
6	3.175	253	Permendur	Permendur	3	320
7	3.175	253	Permendur	M270-50	3	240

Taula 5.4: *Característiques de les simulacions del grup 1. En totes les simulacions es compleix que  $R=100$  mm i  $r=15$  mm*

El material del *yoke* és Permendur. Aquesta elecció és deguda al fet que en aquesta fase del projecte encara no es comptava amb la informació de la corba de magnetització de l'ARMCO, i es va considerar que aquest és el material que més s'hi assembla. Les conclusions dels experiments són vàlides per a ARMCO, tot i que alguns rangs de mesura poden variar i els valors concrets de  $B$  i  $H$  no són els mateixos.

S'ha escollit un radi mig del *yoke* de 100 mm per conveniència de càlculs i de practicitat a l'hora de construir-lo i de transportar-lo. Es tracta d'una bona mida, ni massa gran ni massa petita, similar a la dels models de permeàmetre estudiats al marc teòric. Per altra banda, s'ha escollit un radi menor del *yoke* de 15 mm, que pel propòsit estudiat és un valor raonable.

La bobina de magnetització està distribuïda uniformement al voltant del nucli, deixant un petit espai als pols del *yoke* per acomodar-hi bé la barra.

La separació entre la superfície del *yoke* i fil de coure de la bobina de magnetització s'ha fixat a 0.2 mm, per poder-hi acomodar una capa d'aïllant (poliamida, per exemple) per evitar fuites elèctriques entre el bobinat i el nucli.

## Rangs de mesura

Les densitats de corrent màximes i mínimes de les simulacions són les següents:

- Densitat de corrent mínima:  $J_{min} = 25$  mA/mm<sup>2</sup>.
- Densitat de corrent màxima:  $J_{max} = 2$  A/mm<sup>2</sup>

L'elecció d'aquests corrents es va fer tenint en compte els límits raonables del corrent al fil i volent aconseguir un rang de mesures ampli.

Com que el nombre de voltes i la secció del fil es va fer variar, cada simulació té un rang de  $fmm$  diferent.

### Pèrdues de flux

Es calcula, per aquests experiments, la diferència de flux al punt d' $H$  màxim al *yoke* i al centre de la mostra. D'aquesta manera és possible fer una apreciació de les pèrdues de flux. La fórmula és la següent:

$$Dif(\%) = (\Phi_{yoke} - \Phi_{mostra}) \cdot 100 = \left( \frac{B_{max_{yoke}}}{A_{yoke}} - \frac{B_{0_{mostra}}}{A_{yoke}} \right) \cdot 100 \quad (5.6)$$

És útil conèixer la magnitud de les pèrdues de flux perquè permet fer-se una idea de com poden arribar a condicionar el càlcul d' $H$  a partir del corrent de magnetització i la capacitat del *yoke* de magnetitzar la mostra, però altra vegada es recorda que els càlculs es realitzen en un cas en què el contacte entre els materials és ideal i la seva estructura interna homogènia.

## 5.2.7 Segon grup d'experiments: permeàmetre asimètric

### Modificacions en el model

En aquest apartat es discuteix com les conclusions dels resultats dels experiments anteriors es tradueixen en modificacions en el model.

Primer de tot, s'ha vist que els rangs de mesura del permeàmetre no són els desitjats: el material no s'arriba a saturar o al primer punt ja no es troba a la zona lineal de la corba de magnetització. Per aquest motiu s'ha decidit que no hi haurà una sola bobina de magnetització, sinó dues, dissenyades de tal manera que una proporcioni camps aplicats de petita magnitud al circuit i per l'altra només hi circuli corrent un cop la primera hagi arribat al corrent màxim. És aquesta segona bobina la que acaba de magnetitzar el material, augmentant el rang de mesura. La distribució de flux no serà tan homogènia com amb una bobina de magnetització enrotllada uniformement al llarg del nucli, però deixa de ser un problema si les bobines B i H abasten el mateix fragment de la mostra.

S'ha demanat a l'equip d'ALBA que s'encarregarà de mecanitzar i fabricar el permeàmetre si es creu viable construir un nucli laminat conservant la secció circular. La resposta ha

estat negativa. Per tant, el nou *yoke* conserva la forma de mig arc, però la seva secció és quadrada i té unes mides de 20 cm x 20 cm. S'observa que la seva secció ha disminuït respecte a l'anterior model. Així, gràcies a la reducció de material i del radi de les bobines primàries, el nucli es pot magnetitzar més fàcilment i  $H$  a la mostra també és més gran. És un avantatge perquè s'aconsegueix arribar a punts més alts de la corba BH. El gruix de la mostra es fixa a 5 mm pels següents motius:

- S'ha comprovat que per a un major gruix les pèrdues de flux disminueixen.
- La mostra no se satura tan ràpid.
- La bobina B tindrà una àrea més gran, així que la  $fem$  prendrà valors més alts. Això facilita el tractament del senyal.

### Objectius dels experiments

L'objectiu últim d'aquests experiments és arribar al disseny final del circuit magnètic del permeàmetre asimètric. Es tradueix en els següents objectius específics:

- Definir el rang de mesura del permeàmetre.
- Investigar la força magnetomotriu que cal aplicar per obtenir el rang desitjat.
- Definir la zona disponible per col·locar-hi la bobina  $B$  i el dispositiu de mesura d' $H$ .
- Estudiar el comportament d' $H$  fora de la mostra en la direcció del seu gruix. Amb això es busca valorar la viabilitat de fer servir bobines planes per mesurar la força magnètica.

A cada simulació s'avaluen la densitat de flux magnètic i la força magnètica al centre de la mostra per un grup de valors de densitats de corrent, segons si circula corrent per la bobina N1, la bobina N2 o per ambdues.

Per algunes simulacions seleccionades s'avalua:

- La relació entre el corrent del circuit primari i  $H$  al centre de la mostra.
- La densitat de flux magnètic i la intensitat de camp al llarg de la mostra per un grup de valors de densitats de corrent, segons si circula corrent per la bobina N1, la bobina N2 o per ambdues.
- La força magnetomotriu total aplicada.
- La densitat de flux magnètic màxima al *yoke*.

- La variació d'H en el pla perpendicular a la llargada de la mostra per a diferents  $fmm$  i configuracions del permeàmetre.

### Característiques del model

A la figura (5.6) s'observa un esquema general del model de permeàmetre per a aquestes simulacions.

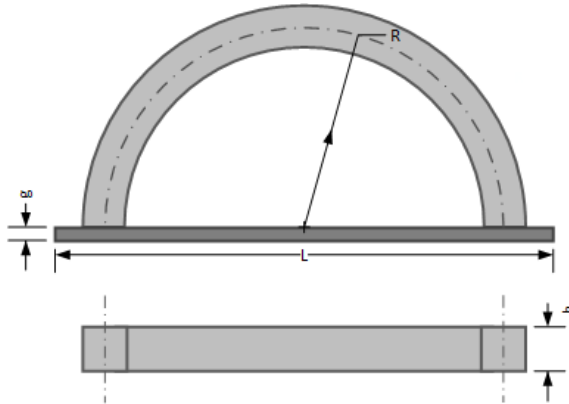


Figura 5.6: *Esquema del permeàmetre asimètric laminat. A la imatge superior se'n mostra la vista en planta, i a la imatge inferior la vista frontal del nucli. Referència la taula 5.5*

En totes les simulacions, l'alçada de la mostra és de 30 mm, la llargada és de 222 mm (per deixar que la mostra surti 1 mm a banda i banda del nucli) i el gruix és de 5 mm. El *yoke* té una alçada de 20 mm i un diàmetre mig de 10 mm .

Com s'ha explicat anteriorment, una de les modificacions del model consisteix a la substitució de la bobina de magnetització única i uniforme per dues bobines amb diferent nombre de voltes i de capes cada una. La bobina N1 escombria els primers punts de la corba de magnetització aplicant camps baixos al circuit magnètic. Aquesta bobina per si sola no és suficient per saturar la mostra amb cap dels materials estudiats. La bobina N2 serveix per a arribar a valors de camps aplicat molt més grans, motiu pel qual compta amb més voltes i més capes que la bobina N1. A la imatge (5.7) es pot veure un esquema del bobinat final, on s'ha eliminat part de les bobines N2 per facilitar la visió dels dos jocs de bobines.

Per segons quins materials N1 i N2 han de funcionar alhora. Cal tenir en compte que quan es tracen els punts de la corba de magnetització mai es pot subministrar un corrent de magnitud més petita que el del punt anterior. Per a la corba BH la seqüència de punts també ha de ser coherent durant les mesures. Per aquest motiu és molt important conèixer



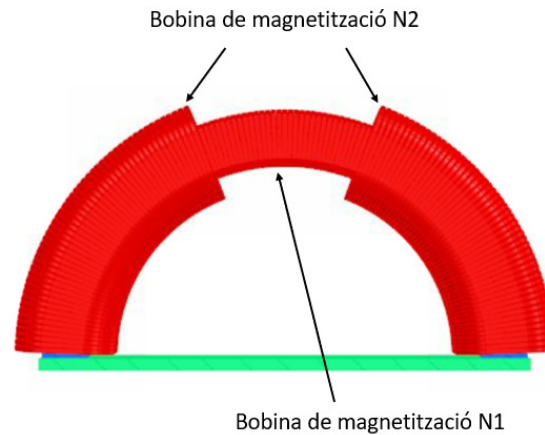


Figura 5.7: *Bobines de magnetització al permeàmetre asimètric laminat.*

en tot moment el corrent que circula per cada una de les bobines de magnetització.

El mallat de la simulació té les següents característiques:

- Mallat a la mostra: és el més fi del model, ja que es vol conèixer amb precisió les mesures de densitat de flux i de força magnètica. La mida màxima dels elements del mallat en aquesta regió és d'1 mm.
- Mallat al *yoke*: la mida màxima dels elements del mallat és d'1.5 mm.
- Per a la resta del model, la mida màxima dels elements del mallat és de 3 mm.
- L'angle màxim entre els elements és de 30°.
- La tolerància absoluta del mallat superficial és d' $1 \cdot 10^{-6}$ .
- La tolerància absoluta del mallat de volum és d' $1 \cdot 10^{-6}$ .
- El tipus de mallat és tetraèdric.

A la figura (5.8) es mostra un fragment del model compost per la meitat de la mostra i la meitat del *yoke* mallats. S'hi observa la diferència de mida entre els elements del *yoke* i de la mostra.

Els experiments es divideixen en dos blocs, cada un dels quals apareix com a resposta a les necessitats sorgides de l'anàlisi de resultats de l'anterior. A la taula (5.5) es poden consultar les característiques de tots els experiments.

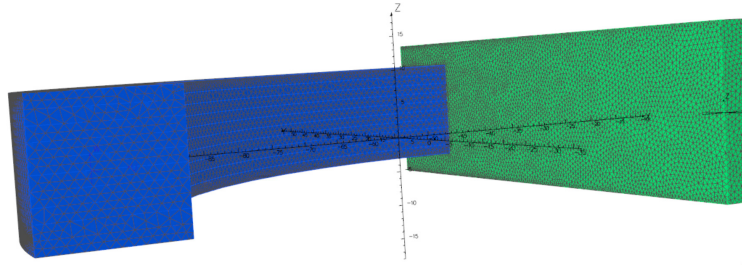


Figura 5.8: *Detall del mallat per al model de permeàmetre asimètric.*

Núm. sim.	Característiques de la simulació (grup 2)					
	Bobines de magnetització				Mostra	
	fmm <sub>1</sub> [A·volta]	fmm <sub>2</sub> [A·volta]	N <sub>c1</sub> N <sub>v1</sub>	N <sub>c2</sub> N <sub>v2</sub>	Material	
Bloc 1	1	10.2 - 204 204	0 32 - 640	1x102	2x160	M270-50
	2	10.2 - 204 204	0 32 - 640			Permendur
	3	10.2 - 204 204	0 32 - 640			M1200-100
	4	10.2 - 204 204	0 32 - 640			ARMCO
Bloc 2	5	6.2 - 310 0	0 240 - 4800	1x124	12x200	M270-50
	6	6.2 - 310 0	0 240 - 3600			Permendur
	7	12.4 - 310 0	0 240 - 6000			M1200-100
	8	6.2 - 310 0	0 240 - 4800			ARMCO

Taula 5.5: *Taula resum de les característiques de les simulacions del grup 2. Totes les simulacions comparteixen les següents característiques:  $R = 100$  mm,  $h = 20$  mm,  $L = 222$  mm,  $g = 5$  mm i  $h_{mostra} = 30$  mm*

## Bloc 1

Es parteix d'un cas estàndard, similar al model dels anteriors experiments amb els canvis mencionats, aplicant forces magnetomotrius baixes, per comprovar els valors mínims i màxims de camp amb la configuració de dues bobines de magnetització diferents.

Pot ser útil trobar una relació entre la intensitat de camp al centre de la mostra i la força magnetomotriu a partir dels punts mesurats en aquest primer bloc d'experiments, encara que el resultat no tingui validesa experimental i es tracti d'un valor aproximat. Coneixent aquesta relació es pot estimar quina força magnetomotriu és necessària per obtenir una intensitat de camp concreta a la zona de mesura, eliminant així la necessitat de configurar més simulacions amb el mètode de prova i error i disminuint considerablement el temps de simulació total. El seu valor correspon al pendent de la recta de tendència entre els

punts mesurats amb coordenades ( $fmm$ ,  $H$ ).

Els paràmetres de les simulacions del bloc 1 es resumeixen a la taula (5.5).

## Bloc 2

Per determinar els paràmetres del model usat pels experiments del bloc 2 s'ha fet servir la relació entre  $H$  i la  $fmm$  de les anteriors simulacions. Coneixent la densitat de flux magnètic màxima que es vol obtenir al centre de la mostra es pot extrapolar, a partir de la corba de magnetització de cada material, la corresponent força magnètica.

Si el càlcul fos exacte només caldria trobar el valor precís d' $H$  que correspon a una densitat de flux concreta, però ja s'ha explicat que els resultats són poc precisos calculats d'aquesta manera. Per tant, s'ha utilitzat el pendent de la línia de tendència comentada només com a mètode d'aproximació.

Abans de fer els càlculs s'han tingut en compte els següents aspectes:

- El material que requereix l'aplicació d'una força magnètica més gran és el M1200-100. Per tant, és el que s'utilitza per calcular la força magnètica màxima.
- La bobina N1 ha de mantenir un producte voltes-capes relativament baix; és a dir, no es pot sobrecarregar. D'altra manera el límit inferior del rang de mesura assoliria valors massa grans.
- Si el producte voltes-capes de la bobina N2 és molt elevat pot produir-se un salt gran i insalvable de la  $fmm$  quan s'encengui la bobina N2. Això pot provocar que aquests dos punts mesurats de la corba estiguin molt distanciats entre ells. Per tal d'evitar-ho es pot obrir el circuit de la bobina N1 perquè deixi de circular-hi corrent just en el moment que es posi en marxa la bobina N2. És molt important que es faci alhora, ja que si no el material deixarà sortirà de l'estat cíclic i s'haurà de desmagnetitzar completament i tornar a fer totes les mesures de la corba. Per tant, les fonts d'alimentació dels circuits primaris han d'estar sincronitzades i les consignes s'han d'enviar a la vegada.

S'agafa com a referència el punt de la corba de magnetització de M1200-100 on  $B = 2.05$  T i  $H_0 = 27454.23$  A/m. Aquesta és la intensitat de camp màxima al centre de la mostra. Per a aquest material, el pendent de la recta que relaciona  $H_0$  i la  $fmm$  és de 4.40.

La força magnetomotriu es pot calcular com  $fmm = \frac{H}{4.40}$ , que dona una magnitud de 6239.53 Avolta. Per tant, l'aportació de corrent de totes les voltes ha de resultar en un

valor molt similar a aquest, tot mantenint un nombre enter de voltes i capes. És convenient que la  $fmm$  resultant sigui lleugerament més gran que la mencionada per no fer curt.

Els punts de l'extrem inferior de la corba no es poden estimar amb aquest mètode perquè la precisió de les simulacions no és suficientment bona. El que sí que s'ha tingut en compte a l'hora de fixar els paràmetres és que el salt entre punts sigui més o menys equidistant tant a la zona lineal com a la zona de saturació, fins i tot quan es connectin les bobines N2. Per això s'ha seguit el mateix procediment que el descrit però per un material amb una permeabilitat més baixa, el Permendur, per a punts intermitjos de la corba de magnetització.

La configuració que permet arribar a les magnituds d' $H$  desitjades respectant l'equilibri entre l'aportació de  $fmm$  dels dos tipus de bobina es pot consultar a la taula (5.5).

### Uniformitat de $B$ i $H$ a la mostra

El següent pas és comprovar la uniformitat de  $B$  i  $H$  a la mostra per determinar quin és la longitud màxima de les bobines del secundari sense cometre errors de mesura considerables.

Per la geometria del permeàmetre, la direcció del camp magnètic i la homogeneïtat del material simulat, tant  $B$  com  $H$  són completament uniformes al llarg de l'amplada i del gruix de la mostra<sup>2</sup>, excepte a la superfície en el cas de  $B$ . Es pot traçar, doncs, una línia entre els dos extrems de la mostra en la direcció longitudinal. Al llarg d'aquesta línia s'avaluen les magnituds de  $B$  i  $H$  amb l'ajuda de gràfiques generades amb Opera.

Quan es parla d'extrems es fa referència no als extrems naturals de la mostra (els punts situats a  $y=-111$  i  $y=111$  mm), sinó als punts finals de la seva longitud magnètica, que, com a l'apartat 5.2.6, s'ha estipulat que és de 200 mm. Per tant, la línia va de  $y = -100$  a  $y = 100$  mm.

No és necessari repetir aquesta operació per a cada combinació de densitats de corrent de cada material. S'identifiquen els casos en què la variació del camp entre els punts situats als extrems i el punt central és màxima. És lògic que aquests casos es corresponguin als de força magnètica més baixa o més alta.

El criteri que s'ha definit per decidir si la diferència de  $B$  i  $H$  és acceptable és el següent:

- $Dif.B < 1\%$

---

<sup>2</sup>Altra vegada, a la realitat és molt possible que aquesta afirmació no es compleixi per irregularitats en el circuit magnètic o per mal contacte entre elements.

- $Dif.H < 5\%$

És natural esperar diferències d' $H$  més importants que de  $B$  perquè el primer varia molt entre mesures respecte el segon, sobretot en l'extrem superior de la corba BH.

### Variació d' $H$ a l'exterior de la mostra

Per les equacions de Maxwell, el component tangencial de la força magnètica a la superfície de la mostra és el mateix que al seu interior. Aquest és el principi general segons el qual operen les bobines planes i la bobina de Rogowski-Chattock. En punts immediatament més allunyats de la superfície, la magnitud d' $H$  experimenta una variació lineal.

La impossibilitat de mesurar  $H$  en punts situats a la superfície amb bobines planes (deguda no només a la distància entre l'eix de la bobina i les espines, que no pot ser zero per raons evidents, sinó també la presència de la bobina B, que dificulta l'accés a la superfície) posa en manifest la necessitat d'estudiar com es comporta  $H$  en punts situats a certa distància. Els extrems de la bobina Rogowski-Chattock no tenen més remei que fer contacte amb la mostra, fet que obliga a optar per una de les dues alternatives: reduir la longitud disponible de la bobina B, implicant una reducció del nombre total de voltes i de la  $fem$ , o col·locar la bobina Rogowski-Chattock fora dels 50 mm centrats al punt mig de la mostra. L'elecció del dispositiu de mesura d' $H$  es tracta a la secció 5.4.5.

L'objectiu últim és veure si  $H$  varia prou linealment perquè amb dues bobines H planes situades a certa distància de la mostra se'n pugui extrapolar el valor real a la superfície, i per tant, al centre. A més, els resultats serveixen com a una verificació del model addicional, perquè si  $H$  es comporta de forma totalment imprevista vol dir que el circuit no s'ha model·litzat bé.

### 5.2.8 Tercer grup: permeàmetre simètric

De cara a l'estudi dinàmic del permeàmetre pot ser convenient tenir definit i caracteritzat un model simètric. El procediment de disseny és molt similar que el seguit a l'anterior apartat i s'avalua, en essència, el mateix. La dificultat d'aquestes simulacions recau en el temps de simulació, molt llarg, i en la definició de la simetria del model.

Els objectius específics dels experiments són els següents:

- Comprovar si les mesures d'un permeàmetre simètric coincideixen, per a una mateixa  $fmm$ , amb les del permeàmetre asimètric.

- En cas negatiu, investigar la força magnetomotriu que cal aplicar per aconseguir el rang desitjat.
- Definir la zona disponible per col·locar-hi la bobina B i el dispositiu de mesura d' $H$ .
- Estudiar el comportament d' $H$  fora de la mostra en la direcció del seu gruix. Amb això es busca valorar la viabilitat de fer servir bobines planes per mesurar la força magnètica.

Per a cada simulació s'avaluen la densitat de flux magnètic i la força magnètica al centre de la mostra per a un grup de valors de densitats de corrent, segons si circula corrent per la bobina N1, la bobina N2 o per ambdues.

Per a algunes simulacions seleccionades s'evalua:

- La relació entre el corrent del circuit primari i  $H$  al centre de la mostra.
- La densitat de flux magnètic i la força magnètica al llarg de la mostra per un grup de valors de densitats de corrent, segons si circula corrent per la bobina N1, la bobina N2 o per ambdues.
- La força magnetomotriu total aplicada.
- La densitat de flux magnètic màxima al *yoke*.
- La variació d' $H$  en el pla perpendicular a la llargada de la mostra per a diferents  $fmm$  i configuracions del permeàmetre.

### Característiques del model

La simetria del model està definida com a simetria rotacional de  $180^\circ$  al voltant de l'eix vertical Z. El corrent de les bobines del costat positiu de l'eix ha de tenir signe positiu, mentre que el del costat contrari ha de ser negatiu, per tal que tot el flux magnètic entri a la mostra per un extrem i en surti per l'oposat.

Per aportar la mateixa  $fmm$  al circuit el producte  $N_c \cdot N_v$  s'ha de conservar, i per tant a cada costat del nucli s'hi ha de col·locar la meitat del nombre de capes que conté el permeàmetre simètric.

El mallat és el mateix que a l'apartat anterior.

Les simulacions es divideixen en dos blocs. A la figura (5.9) es mostra el model simulat al segon bloc de simulacions. Igual que abans, s'han eliminat unes quantes espiras del mig

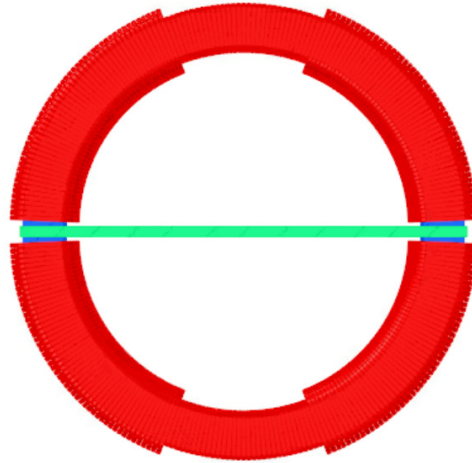


Figura 5.9: Model del permeàmetre simètric (bloc 2).

per facilitar la visió dels dos conjunts de bobines. La taula (5.6) mostra les característiques de les simulacions.

	Núm. sim.	Característiques de la simulació (grup 3)				
		Bobines de magnetització				Mostra
		$fmm_1$ [A·volta]	$fmm_2$ [A·volta]	$N_{c1}N_{v1}$	$N_{c2}N_{v2}$	Material
Bloc 1	1	310	240 - 6000	1x124	6x400	M1200-100
Bloc 2	2	620	480 - 12000	1x248	12x400	M1200-100
	3	12.4 - 620	0			Permendur

Taula 5.6: Taula resum de les característiques de les simulacions del grup 3.

## Bloc 1

En el bloc 1 es fan les simulacions pertinents per investigar si conservant la força magnetomotriu el rang de mesura es manté igual o molt similar. En cas negatiu, pot ser molt útil utilitzar el mètode descrit a l'apartat anterior per estimar la  $fmm$  que caldria per tal d'arribar a les mateixes forces magnètiques.

En aquets bloc només es simula amb un únic material a la mostra: M1200-100. Es realitza pels punts més alts de la corba de magnetització, ja que són els que limiten el rang.

Les característiques de les simulacions del bloc 1 es mostren a la taula (5.6).

## Bloc 2

Tal i com que succeeix amb el bloc 2 del permeàmetre asimètric, les característiques d'aquest bloc no es poden conèixer fins que s'han analitzat els resultats de l'anterior. Són

les de la taula (5.6), al bloc 2.

També interessa fer simulacions amb el Permendur per verificar que el rang de mesura no es veu retallat en el límit inferior.

### 5.2.9 Dimensionament de les bobines de magnetització

Com s'ha comentat anteriorment, les característiques de les bobines de magnetització modelitzades amb Opera no són les reals. En aquest apartat s'escull un diàmetre estandaritzat de fil dels disponibles de l'AWG<sup>3</sup> i es dissenya en detall el circuit magnètic per tal que subministri com a mínim una força magnetomotriu igual a la màxima simulada per cada bobina.

Tant per les bobines N1 com N2 s'ha seleccionat un fil #AWG17. A continuació se'n llisten les característiques:

- Diàmetre del conductor: 1.15062 mm
- Secció del conductor: 1.04 mm<sup>2</sup>
- Ohms per km: 16.60992 Ω/km
- Corrent màxim per a transmissió de potència: 2.9 A
- Corrent màxim per a cablejat de xassís: 19 A
- Freqüència màxima per al 100% de profunditat de penetració: 13 KHz

Al diàmetre del conductor se li han de sumar uns 0.025 mm d'aïllament.

#### Corrents màxims i mínims del circuit primari. La font CAEN-els

Com ja s'ha explicat, un dels paràmetres que intervenen en la consecució de mesurar un rang ampli de valors de camp de la corba BH és el corrent mínim estable que pot proporcionar la font. La font CAENels assegura un error de menys del 0.05% per tot el rang de corrent de sortida, una estabilitat del mateix de 50 ppm i un ripple de 30 ppm. No hi ha dades per a intensitats baixes en concret, tot i que per experiments amb bobines duts a terme a ALBA s'ha vist que és força estable fins als 100 μA.

Per altra banda, la densitat de corrent màxima que pot circular pel fil del bobinat no pot excedir de 3.016 A/mm<sup>2</sup> ( $I=2.9$  A per al mateix fil de l'apartat anterior, #AWG=17), ja que a partir d'aquest valor el fil del bobinat pot experimentar danys permanents.

---

<sup>3</sup>American Gauge Society



Així doncs, en realitat el rang de la  $fmm$  és encara més ampli del que s'havia suposat als apartats anteriors. No obstant això, existeix una altra limitació lligada a la font CAENels del laboratori, i és que el subministrament màxim són 20 V. Posat que el fil del bobinat de magnetització té una resistència no menyspreable és possible que les necessitats de  $fmm$  requereixin arribar a voltatges per sobre d'aquest valor. La secció del fil s'ha escollit amb l'ànim de minimitzar la caiguda de voltatge al fil perquè no s'assoleixin els 20 V amb el permeàmetre asimètric, tot assegurant que el ritme de canvi de corrent és màxim (és a dir, treballant amb corrents baixos).

Per altra banda, les fonts CAENels es caracteritzen per tenir un *slew rate* molt elevat: de 5 A/ms. No obstant això, aquestes dades també es van consultar amb els membres del departament de mesures magnètiques i, per recomanacions del fabricant, l'*slew rate* màxim de les seves dues fonts està fixat a 20 A/s. Per tant, aquest és l'*slew rate* amb què es realitzaran els canvis de corrent.

### Càlcul del nombre de voltes i de capes

En el permeàmetre asimètric, les forces magnetomotrius mínimes requerides a cada bobina són 310 A · volta per a la N1 i 6000 A · volta per a la N2, les màximes simulades. Amb aquestes dades es calculen el nombre de voltes i de capes per a cada una. El procés és el mateix pel permeàmetre simètric, ja que la configuració de cada meitat del circuit magnètic i del bobinat de magnetització és igual que la del permeàmetre asimètric. L'única diferència és que paràmetres com el nombre de voltes total, la longitud del conductor i la resistència del fil s'han de multiplicar per dos.

Pel fil escollit, que té una secció transversal d'1.04 mm<sup>2</sup>, tenint en compte l'aïllant el diàmetre real  $d_{fil}$  és de 1.175 mm aproximadament. Això implica que cada capa  $N_i$  redueix el radi intern  $R_{min}$ , i per tant el nombre de voltes per capa màxim ve donat per la següent expressió:

$$N_{màx} = \sum_{i=1}^k (\pi(r_{int_y} - N_{v_i} \cdot d_{fil}) - L_{s_i}) / d_{fil} \quad (5.7)$$

on  $r_{int_y}$  és el diàmetre interior del *yoke* sense bobinar,  $d_{fil}$  és el diàmetre del conductor amb l'aïllament i  $N_{v_i}$  és el nombre de voltes de la capa  $i$ .

$L_{s_i}$  és la distància de seguretat entre els extrems de la bobina i els del *yoke* per tal que el bobinat no arribi a tocar la mostra. Es desitja que sigui d'uns 4 mm sobre  $r_{int_y}$ . Resulta

que  $L_s$  és funció de  $N_{v_i}$ , i per tant de la capa  $i$ :

$$L_{s_i} = 2 \cdot (r_{int_y} - N_{v_i} \cdot d_{fil}) \cdot \frac{4}{r_{int_y}} \quad (5.8)$$

A partir de la  $fmm_{1_{min}}$  es pot obtenir el nombre de capes per capa  $N_{v_1}$ , tal i com es mostra a la següent equació:

$$N_{v_1} = \frac{fmm_{1_{min}}}{N_{c_1} \cdot J_1 \cdot S_1} \quad (5.9)$$

Si surt un nombre decimal s'ha d'arrodonir a l'enter superior. El producte  $J_1 \cdot S_1$ , que és en realitat el corrent que circula pel fil, ha de complir la condició de ser més petit que el corrent màxim per a la transmissió de potència, de tal manera que  $J_1 \cdot S_1 < 2.9$  A. El mateix per a  $J_2 \cdot S_2$ . Per tal que no hi hagi perill de sobreescalfament, el seu valor s'ha fixat en 2.3 A en ambdós casos. Per altra banda, cal donar un valor al nombre de capes  $N_{c_1}$ , que és el paràmetre d'entrada. Per conveniència i semblança amb el model simulat  $N_{c_1} = 1$  capa. Només queden dues variables: el nombre de capes i de voltes de N2.

$N_{c_2}$  també s'ha de fixar, però amb la condició que la  $fmm$  sigui superior a 6000 A. El nombre de voltes per capa de la bobina N2  $N_{v_2}$  es pot calcular de la següent manera:

$$N_{v_2} = \frac{N_{màx} - N_{c_1} \cdot N_{v_1}}{N_{c_2}} \quad (5.10)$$

arrodonint a l'enter superior. I per tant:

$$fmm_2 = N_{c_2} \cdot N_{v_2} \cdot J_2 \cdot S_2 > 6000A \quad (5.11)$$

## Estudi tèrmic

En aquest apartat es fa un breu estudi tèrmic de la bobina de magnetització. Es calcula la diferència de temperatura ( $\Delta T$ ) deguda al corrent que circula per les dues bobines de magnetització. La següent expressió mostra el seu càlcul:

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2}{h \cdot S} \quad (5.12)$$

On  $R$  és la resistència del fil en Ohms,  $I$  és el corrent que hi circula en Ampères,  $S$  és la superfície de la bobina en  $m^2$  i  $h$  és el coeficient de transferència de calor convectiu en  $W/(m^2K)$ , que en aquest cas té un valor aproximat de 15  $W/(m^2K)$  (font: document intern d'ALBA).

$S$  és la suma de les superfícies exterior, interior i laterals de la bobina:

$$S = S_{exterior} + S_{interior} + S_{laterals} \quad (5.13)$$

El *yoke* té secció rectangular, i la seva amplada ( $a_{yoke}$ ) és igual a la seva alçada: per tant, l'amplada i l'alçada de la bobina també són iguals. Per això es pot aplicar la següent equació:

$$S_{laterals_2} = 2 \cdot a_{màx_2}^2 \quad (5.14)$$

on  $a_{màx_2}$  és l'amplada màxima de la bobina de magnetització N2 i es pot calcular segons l'equació 5.15:

$$a_{màx_2} = a_{yoke} + 2 \cdot N_{c_{màx}} \cdot d_{fil} \quad (5.15)$$

on  $N_{c_{màx}}$  és el nombre de capes de la bobina N1 més el de la bobina N2.

Les superfícies interna i externa de la bobina N2 són una mica més difícils de calcular, perquè en alguns trams hi ha  $N_{c_2}$  capes i en d'altres  $N_{c_2} + N_{c_1}$ . Per poder resoldre el problema es necessita conèixer la longitud del tram en què hi ha més capes. Aquest paràmetre, que és en realitat la longitud de N1, es pot conèixer tal i com s'indica a continuació:

$$L_{N1} = \frac{N_{v_1} \cdot d_{fil}}{r_{int_{yoke}} - d_{fil}/2} \cdot r_{mig_{yoke}} \quad (5.16)$$

on, per les mides del circuit magnètic,  $r_{int_{yoke}} = 90$  mm i  $r_{mig_{yoke}} = 100$  mm. Com a màxim es pot donar el cas que  $L_{N1} = L_{N2}$ , cosa que voldria dir que la bobina N1 ocupa una capa sencera o més.

El càlcul de la superfície interna es mostra a la següent equació:

$$S_{interna_2} = 4 \cdot (a_{yoke} \cdot (L_{N2} - L_{N1}) + (a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_1}) \cdot L_{N1}) \quad (5.17)$$

on la longitud de la bobina, N2  $L_{N2}$ , és igual al perímetre mig del *yoke* menys dues vegades la separació de seguretat, que es recorda que és de 4 mm.

La superfície externa de la bobina N2 es pot trobar tal i com es mostra a continuació:

$$S_{exterior_2} = 4 \cdot ((a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_{màx}}) \cdot L_{N1} + (a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_2}) \cdot (L_{N2} - L_{N1})) \quad (5.18)$$

Ara que ja es coneixen totes les superfícies de la bobina N2, per trobar les de la bobina N1 calen menys càlculs. La superfície externa de la bobina N1 es calcula segons la següent

equació:

$$S_{exterior_1} = 4 \cdot (a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_1}) \cdot L_{N1} \quad (5.19)$$

La superfície interna de la bobina N1 es pot calcular segons l'equació (5.20), i la superfície dels laterals, segons la fórmula (5.21).

$$S_{interior_1} = 4 \cdot a_{yoke} \cdot L_{N1} \quad (5.20)$$

$$S_{laterals_1} = 2 \cdot (a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_1})^2 \quad (5.21)$$

Els metres de conductor de la bobina N2 ( $L_{fil_{N2}}$ ), a partir dels quals es pot saber la resistència del fil, es calculen amb l'equació (5.22):

$$L_{fil_{N2}} = \left( \sum_{i=1}^k 4 \cdot (a_{yoke} + 2 \cdot d_{fil} \cdot N_{c_i}) \cdot N_{v_i} \right) - L_{fil_{N1}} \quad (5.22)$$

on  $N_{c_i}$  i  $N_{v_i}$  són respectivament el nombre de capes i de voltes de la capa  $i$ -èssima (sense diferenciar entre N1 i N2). Com que la bobina N1 només té una capa, la longitud  $L_{fil_{N1}}$  és més fàcil de calcular:

$$L_{fil_{N1}} = 4 \cdot (a_{yoke} + 2 \cdot N_{c_1} \cdot d_{fil}) \cdot N_{v_1} \quad (5.23)$$

La resistència del fil  $R$  és diferent per a cada bobina i és el producte dels Ohms per km, que per al fil #AWG18 són iguals a 16.60992  $\Omega$ /km, i els metres de conductor.

Es calcula el pitjor cas, és a dir, quan el corrent que circula per ambdues bobines de magnetització és igual a 2.3 A ( $I_{max}$ ). Un cop es coneix la variació de temperatura, es pot trobar la resistència màxima del fil de cada bobina, un paràmetre important ja que el voltatge de la font de corrent està limitat a 20 V, i per tant s'ha de complir que  $I_{max} \cdot R_{max} < 20$  V. El càlcul és el següent [24]:

$$R_{max} = R_{fil} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T) \quad (5.24)$$

on  $\alpha_{Cu}$  és el coeficient de temperatura del coure i té un valor de  $3.93 \cdot 10^{-3}$  1/K (font: [24]).

## Seguretat del dispositiu

Coneixent d'entrada la magnitud aproximada del corrent de magnetització és molt clar que existeix una situació de perill per a l'usuari si no es prenen les mesures de seguretat

adequades, més tenint en compte que el procés es duu a terme pràcticament en CC.

Per tal de minimitzar el perill elèctric és imperatiu prendre les següents mesures:

- Les bobines N1 i N2 s'han de separar amb una capa de material aïllant, a més de per una funda metàl·lica connectada a terra, per tal de mantenir els dos circuit a caigudes de tensió diferents sense perill.
- La capa exterior de la bobina de magnetització ha d'estar aïllada perquè no hi pugui haver contacte elèctric amb l'usuari.
- El *yoke* també s'ha de recobrir amb una capa d'aïllant per prevenir dels efectes dels corrents de Foucault en l'usuari.
- Tots els aïllaments entre components es faran amb diverses capes de *kapton* de categoria IP2X.

A banda, tots els fils conductors han d'estar coberts per una capa d'aïllant i les connexions entre cables s'han de fer amb virolles terminals adequades a la secció del cablejat.

## 5.3 Estudi del comportament dinàmic

Com s'ha vist, conèixer el comportament dinàmic del permeàmetre és essencial perquè permet deduir la magnitud i la forma de la *fem* induïda al secundari. Per tant, l'objectiu últim d'aquestes simulacions és obtenir les dades de temps de canvi de  $B$  i de magnitud dels corrents de Foucault necessàries per realitzar el disseny del circuit secundari del permeàmetre.

### 5.3.1 Casos d'estudi

Tal i com s'ha introduït, les simulacions en condicions dinàmiques han de permetre conèixer la constant de temps del senyal de  $B$  al secundari i avaluar la magnitud dels corrents de Foucault.

Cal, però, escollir un nombre assumible de casos d'anàlisi, ja que per les característiques d'Opera 2D no és possible reproduir tots i cada un dels punts simulats a l'anàlisi magnetoestàtic i conèixer el comportament dinàmic del conjunt en aquestes circumstàncies. L'elecció d'aquests casos fa el procés molt més àgil i permet centrar-se en les situacions més limitants, és a dir, en aquells que acabin generant una *fem* màxima o mínima en el

secundari i en què els corrents de Foucault tinguin més o menys presència. Són els que es descriuen a continuació.

### **Corrents de Foucault segons el mètode de mesura**

La magnitud de la *fem*, i per tant el senyal que s'ha de tractar, depenen no només del circuit magnètic del permeàmetre, del primari i del secundari, sinó també del mètode de mesura; és a dir, de com són els salts de corrent (i de la força aplicada).

La magnitud i per tant la presència dels corrents parasitaris induïts augmenten amb la variació de l'intensitat de camp magnètic. És a dir: no és el mateix passar de 9900 A/m a 10000 A/m que de -10000 A/m a 10000 A/mT, encara que el rati de canvi del corrent de magnetització sigui el mateix en ambdós casos. El primer cas és el que es dona amb el mètode dels *steps*, i el segon amb el mètode de les inversions.

Un dels objectius d'aquestes simulacions és el de determinar si és possible fer servir el mètode de les inversions sense que l'error induït pels corrents de Foucault interfereixi en les mesures, o si, pel contrari, cal optar per fer variar el camp amb *steps* petits.

Malauradament, el programa no permet fer salts de corrents negatius a positius, per la qual cosa sempre es parteix de 0 A i les “inversions” són en realitat salts entre el punt en què el material es troba desmagnetitzat a un altre de la seva corba BH.

En el cas del mètode dels *steps* succeeix quelcom de semblant, i només es poden fer variacions des de 0 A/m. S'avalua la resposta de *B* i els corrents de Foucault quan es fa una variació de 0 T a aproximadament 0.1 T, que és més o menys de la mateixa magnitud dels *steps* que es faran servir per traçar la corba BH del material de la mostra.

### **Corrents de Foucault segons el material de la mostra**

De l'equació (4.10) se sap que com més altes són la conductivitat i la permeabilitat, més gran és la constant de temps i més trigarà *B* a estabilitzar-se.

Per tant, els pitjors casos són aquells en què el producte de les dues és màxim. Són interessants el materials M1200-100 per la seva elevada conductivitat i Permendur per l'alta permeabilitat que presenta a la zona lineal.

Per altra banda, el M1200-100 es magnetitza amb menys facilitat que la resta de materials, per la qual cosa la variació d'*H* per cada punt de mesura és més gran i els corrents de Foucault es maximitzen. Amb el Permendur succeeix el contrari, cosa que fa els dos casos fàcilment comparables.

Les simulacions es realitzen només per a aquests dos materials.

### Corrents de Foucault segons la geometria del permeàmetre

Una de les principals motivacions a l'hora de fer l'anàlisi dinàmic és el de comparar l'evolució en el temps tant de  $B$  com dels corrents de Foucault a la mostra a les dues geometries: la simètrica i l'asimètrica.

Es vol comprovar si, tal i com suggereix la teoria, en el cas del simètric els corrents parasitaris tenen menys presència i fins a quin punt els resultats són més favorables.

#### 5.3.2 Procediment

Els corrents de Foucault, que influeixen en la mesura de  $B$ , són el principal fenomen que s'avalua en aquest apartat. Amb l'objectiu d'estudiar-ne la magnitud s'ha creat un model en 2D del permeàmetre (ALBA no té llicència d'Opera 3D per fer simulacions de magnetisme dinàmic) aplicant diferents funcions de corrent a les bobines de magnetització. A la figura (5.10) es pot veure una representació del model simètric amb el mallat dels materials.

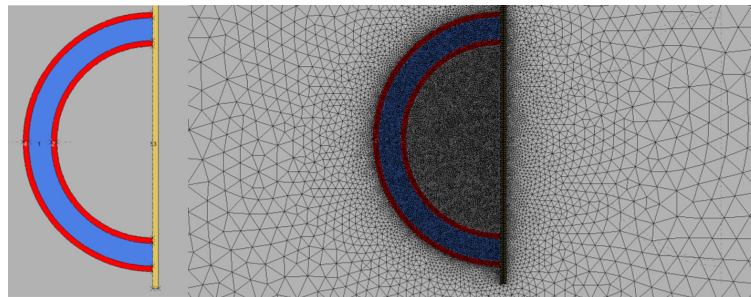


Figura 5.10: Model del permeàmetre asimètric a Opera 2D. A l'esquerra es mostra la vista general del model, i a la dreta se'n pot apreciar el mallat. S'observa que per als elements més petits és més fi.

Primer de tot s'ha tractat el model en mode magnetoestàtic per saber quina és la densitat de corrent que s'ha d'aplicar a les bobines per tal d'assolir un camp donat al centre de la mostra.

Un vegada dissenyat el model en 2D amb corrent constant, les funcions per al corrent variable de les bobines són escollides per intentar imitar el comportament de la font d'alimentació CAENels. La funció d'entrada en totes les simulacions és una rampa, on el corrent va de  $I_1$ <sup>4</sup> a  $I_2$  en un temps determinat per l'*slew rate* de la font, que es recorda que

<sup>4</sup>En aquests anàlisis, per limitacions del programa,  $I_1$  sempre és zero.

és de 20 A/s. Per tant, el rati de canvi del corrent és fix a cada bobina de magnetització, però no es pot dir el mateix de la  $fmm$  total.

S'ha determinat la densitat  $J$  dels corrent de Foucault al centre de la mostra, la magnitud del corrent total a la mostra, i el temps que triga aquesta a assolir la densitat de flux i la intensitat de camp en mode magnetoestàtic avaluats al mateix punt central.

Es presenten resultats pel permeàmetre asimètric i per l'asimètric. Per cada un d'ells es determina quin o quins són els mètodes de mesura viables, els casos en què els temps d'estabilització de  $B$  i el corrent total són màxims o mínims.

## 5.4 Dimensionament de la bobina B

En aquest apartat es desenvolupa el procediment de dimensionament de la bobina B. L'explicació està molt centrada en l'estudi de la  $fem$ , perquè la seva forma i el seu valor màxim són determinants en el disseny de l'electrònica del circuit secundari.

### 5.4.1 Consideracions de disseny

La força electromotriu induïda a la bobina B es calcula segons l'equació 5.25.

$$fem = N \cdot S_b \cdot \frac{dB}{dt} \quad (5.25)$$

El nombre de voltes de la bobina secundària  $N$  és un paràmetre que es pot modificar per obtenir senyals més grans o més petits, però existeixen certs límits. El nombre de voltes està acotat no només per la longitud disponible, sinó també per les capes que es poden bobinar sense perdre precisió en la mesura de  $B$ .

La secció de la bobina  $S_b$  es pot calcular a partir de l'àrea de la mostra (30 mm x 5 mm), el diàmetre del fil utilitzat amb l'aïllant i el gruix de la base de la bobina. S'ha determinat que el gruix de la base de la bobina és d'1 mm, de tal manera que la secció resultant expressada en mil·límetres es pot calcular de la següent manera:

$$S_b = (30 + 1 + N_{c_b} \cdot \frac{d_{fil+aïllant}}{2}) \cdot (5 + 1 + N_{c_b} \cdot \frac{d_{fil+aïllant}}{2}) \quad (5.26)$$

que depèn del nombre de capes que tingui la bobina B.

El rati de canvi del corrent i per tant el de la intensitat de camp és constant, però, tal i com s'ha vist, no succeeix el mateix amb  $\frac{dB}{dt}$ . Per tant, la  $fem$  no es pot calcular com  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$



perquè s'estaria cometent un error important. Això representa un obstacle en el disseny de la bobina B, ja que complica considerablement els càlculs.

La resposta de la densitat de flux a un canvi de corrent és molt semblant a la d'un sistema de primer ordre amb una consigna de tipus *step*<sup>5</sup>. A partir d'aquí, i coneixent-ne la constant de temps, fàcilment es pot modelitzar el sistema i simular-lo amb l'objectiu d'estudiar la funció  $\frac{dB}{dt}$ .

S'utilitza l'eina Simulink de Matlab per fer el model. Es mostra a la figura (5.11) i és vàlid tant per al permeàmetre simètric com per a l'asimètric. Aproximant el model de

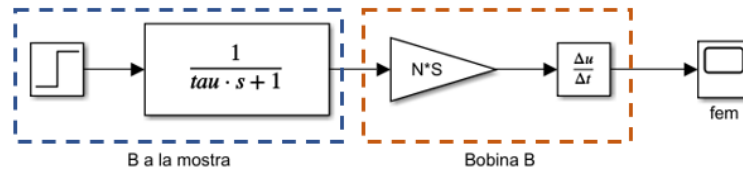


Figura 5.11: Model de la bobina B al Simulink. Els elements a dins del requadre blau formen el model de la variació de B a la mostra, i els que es troben a l'interior del requadre vermell (guany i derivada) són la bobina B. La sortida del sistema és la fem.

l'evolució de B a la mostra a un sistema de primer ordre com el de la figura (5.11), se sap que la seva resposta a un step segueix la següent funció:

$$B(t) = \Delta B \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.27)$$

On  $\Delta B = B_{final} - B_{inicial}$ . Si es deriva respecte el temps, s'obté la següent equació:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{\Delta B}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (5.28)$$

S'ha de tenir en compte que quan el senyal es deriva s'hi afegeix un guany K. Per tant, la funció  $fem(t)$  té la següent forma:

$$fem(t) = A \cdot e^{-t/\tau} \quad (5.29)$$

<sup>5</sup>Malgrat que el corrent es fa variar entre dos valors amb una rampa de pendent elevat, si es volen replicar els resultats de l'apartat 5.3 és preferible que la consigna sigui *step*, perquè en els gràfics obtinguts no es pot separar la constant de temps de B de la variació de B deguda a  $\frac{dH}{dt}$  en el moment de canvi del corrent.

on  $A$  és una constant que es pot calcular segons la següent expressió:

$$A = \frac{K\Delta B}{\tau} = \frac{N \cdot S_b \cdot \Delta B}{\tau} \quad (5.30)$$

Aquesta constant coincideix amb el valor màxim de la  $fem$ , ja que a l'instant  $t = 0 \rightarrow fem(0) = A$ , i per a  $t > 0$  la força electromotriu disminueix exponencialment.

La bobina B estarà muntada sobre un suport de *Delrin* / *POM* per facilitar l'inclusió i extracció de la mostra.

## 5.4.2 Permeàmetre asimètric

Segons els resultats obtinguts en l'apartat anterior (vegeu els punt 6.2.2 al capítol de Resultats per a més informació), per al permeàmetre asimètric només s'haurien de simular dos casos, ambdós per a una variació de  $B$  d'aproximadament 0.1 T, amb diferents material de la mostra: Permendur i M1200-100. A partir de les simulacions s'han extret les seves respectives constants de temps, que es poden consultar a la taula (5.7) i són les resultants de l'anàlisi dinàmic. No obstant això, com s'ha explicat a l'apartat de l'anàlisi dinàmic, es

Constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre asimètric.			
Mètode de mesura	Material	$\Delta B$ [T]	$\tau$ [s]
<i>Steps</i>	Permendur	0.1	0.2
<i>Steps</i>	M1200-100	0.1	0.2

Taula 5.7: *Constants de temps de la funció  $B(t)$  i variació de  $B$  obtingudes a partir de les simulacions de l'apartat 6.2.2. Permeàmetre asimètric.*

desconeix com es comporta la funció  $B(t)$  en l'extrem superior de la corba, és a dir, pels últims *steps*. Segons la fórmula (4.10), la constant de temps té una relació proporcional amb la permeabilitat. Quan s'ha fet l'anàlisi dinàmic s'ha comprovat que això és cert. Si disminueix la constant de temps augmenta la magnitud màxima de la  $fem$ , i per tant l'únic perill que existeix és que el temps d'estabilització sigui tan petit que la  $fem$  prengui valors inassumibles. Però existeix un límit:  $T_s \geq \Delta t_h$ , és a dir, per força el temps d'estabilització ha de ser més gran o igual que el temps de canvi del corrent. Es simula un cas en què  $T_s = \Delta t_h$  per comprovar si es pot donar aquesta situació. La  $fem$  màxima mai no podrà ser superior a la d'aquest cas, ja que  $\Delta B$  es manté constant<sup>6</sup> i  $\Delta t_H$  augmenta amb  $H$ .

<sup>6</sup> $\Delta B$  és constant perquè es volen fer variacions de 0.1 T. El que no és constant és  $\frac{dB}{dt}$ .

### 5.4.3 Permeàmetre simètric

Com que dels resultats de l'anàlisi dinàmic s'ha conclòs que amb el permeàmetre simètric és viable fer servir el mètode de les inversions, s'han de fer les simulacions pertinents per estudiar la derivada  $dB/dt$  en aquest cas i en el de la variació amb *steps*. Així, ha calgut fer 7 simulacions en total, 5 pel primer mètode i 2 pel segon. Les especificacions i les constants de temps de cada una es llisten a la taula (5.8). En aquelles simulacions que recreen la

Constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre simètric.			
Mètode de mesura	Material	$\Delta B$ [T]	$\tau$ [s]
<i>Steps</i>	Permendur	0.1	0.06
<i>Steps</i>	M1200-100	0.1	0.07
Inversions	Permendur	0.2	0.06
Inversions	M1200-100	0.2	0.07
Inversions	Permendur	1	0.08
Inversions	Permendur	4.4	0.008
Inversions	M1200-100	4	0.024

Taula 5.8: *Constants de temps de la funció  $B(t)$  i variació de  $B$  obtingudes a partir de les simulacions de l'apartat 6.2.3. Permeàmetre simètric.*

resposta de  $B$  quan es fa una inversió de corrent, la densitat de flux magnètic a la qual s'estabilitzen s'ha multiplicat per 2, cosa que dona una idea més real dels voltatges que es poden esperar als terminals de la bobina. Això es veu reflectit a la columna  $\Delta B$  de la taula (5.8). Idealment s'hauria de conèixer la constant de temps quan es fa el salt de  $-B_i$  a  $B_i$ , però ja s'ha explicat per què no ha estat possible. Sent plenament conscients d'aquesta limitació, els resultats presentats són aproximats però completament funcionals, ja que en general es pot considerar que la constant de temps en ambdós casos és similar.

### 5.4.4 Espectre freqüencial del senyal B

Abans de dissenyar l'electrònica del circuit secundari ha calgut determinar l'espectre freqüencial de la *fem* per estudiar si existeix una limitació d'ample de banda.

Per les constants de temps ja es pot intuir que l'espectre no mostrarà freqüències gaire elevades. Tot i així, s'ha considerat convenient analitzar almenys el pitjor dels casos per a cada mètode mesura, és a dir, quan el temps d'estabilització és més petit i la variació de  $B$  més brusca. Aquests dos casos són els següents:

- Per al mètode de les inversions (permeàmetre simètric), quan la constant de temps és mínima i la variació de densitat de flux màxima.

- Per al mètode dels *steps* (permeàmetres asimètric i simètric), quan  $B$  s'estabilitza en el moment just en què s'arriba el corrent de magnetització deixa de canviar. Com s'ha esmentat, aquest és un cas hipotètic i només serveix com a indicador del que podria passar en la situació més limitant.

S'ha definit un temps de mostreig  $T_m = 10 \mu\text{s}$  i s'ha passat a discret el model de la figura (5.11).

### 5.4.5 Dimensionament de les bobines H

En el següent apartat s'explica quin ha estat el procés de disseny de les bobines H, i també es fa un anàlisi de l'ample de banda de la  $fem$  generada, tot amb l'ànim de proporcionar la informació necessària per dimensionar el circuit electrònic.

#### Mètode de mesura d'H

Existeixen dues opcions per mesurar  $H$ : utilitzar una bobina Rogowski-Chattock o dues bobines planes. En aquest punt del treball es disposa de prou informació per escollir. S'ha optat per fer servir les dues bobines per les següents raons:

- S'ha vist que el camp varia linealment en la direcció del gruix de la mostra, demostrant així que es poden fer servir les bobines planes, ja que no hi ha necessitat que el dispositiu faci contacte amb el material.
- És possible que l'accés a la mostra, i sobretot el bon contacte entre aquesta i la bobina Rogowski-Chattock, es vegi dificultat per raons físiques. La solució de les dues bobines planes és més flexible.
- És molt més barat fer servir bobines planes.

#### Consideracions de disseny

A l'exterior del material,  $H$  canvia des d'un valor de partida a un de final de manera quasi immediata quan es produeix una variació de la  $fmm$ . En aquest cas no cal parlar de constants de temps, perquè el ritme de canvi d' $H$  només ve determinat per l'*slew rate* de la font de corrent.

La intensitat de camp es pot conèixer mesurant  $B$  a l'exterior de la mostra i molt a prop

de la seva superfície ( $B_{exterior}$ ) i aplicant la següent fórmula:

$$H = \frac{B_{exterior}}{\mu_0} \quad (5.31)$$

Òbviament, la magnitud de  $B_{exterior}$  és molt petita, cosa que d'entrada ja fa pensar en la necessitat de requerir d'una etapa d'amplificació prèvia a la integració de la  $fem$ .

La  $fem$  induïda a les bobines planes ve donada per l'expressió (5.31).

$$fem = N \cdot S_b \cdot \frac{dB_{superficie}}{dt} = N \cdot S_b \cdot \frac{\Delta B_{superficie}}{\Delta t} \quad (5.32)$$

Es considera que les bobines H haurien de ser de la mateixa llargada (o molt similar) que la bobina B: així, la  $fem$  als dos jocs de bobines secundàries amiltjana les distribucions de  $B$  i  $H$  en un mateix tram de la mostra per tal de tenir la mateixa equivalència d' $H$  respecte  $B$ . D'aquesta manera es garanteix que el punt mig mesurat, de coordenades  $(H_i, B_i)$ , coincideixi amb un punt de la corba BH, i es minimitza l'error. La secció de la bobina H es pot calcular a partir de la següent expressió:

$$S_b = \left(30 + N_{cb} \cdot \frac{d_{fil+aïllant}}{2}\right) \cdot \left(1 + N_{cb} \cdot \frac{d_{fil+aïllant}}{2}\right) \quad (5.33)$$

Es recorda que la secció resultant és molt reduïda perquè es tracta d'una bobina plana.

La bobina H ha de tenir prou voltes perquè la  $fem$  resultant tingui una magnitud apreciable per a l'instrumentació, però per tal de poder-la situar tan a prop de la mostra com sigui possible és més convenient si no se sobrecarrega amb més capes del compte. A més, s'ha de procurar que la secció del fil sigui prou gran per poder bobinar. Cal buscar un equilibri.

Per tal de determinar  $\Delta t$  a la fórmula (5.32) n'hi ha prou de conèixer la variació d'I i l'*slew rate*:

$$\Delta t = \frac{\Delta I}{SR} \quad (5.34)$$

#### 5.4.6 Permeàmetre asimètric

Si s'hagués utilitzat una sola bobina de magnetització, el ritme de canvi d' $H$  seria molt similar entre les mesures d'un mateix material, tant amb el mètode de les inversions com

el d'*steps*<sup>7</sup>. El que succeeix amb aquesta configuració de bobines és que  $H$  varia molt més ràpidament quan es fa un salt del corrent de N2.

Això vol dir que la *fem* és mínima quan circula corrent només per la bobina N1, en el punt en què es fa la primera mesura. Per altra banda, la *fem* és màxima quan es fa variar el corrent de N2, en el punt més alt de la corba de magnetització.

La variació de corrent, i per tant de temps durant el qual es produeix la variació lineal d' $H$ , es calcula tal i com es mostra a continuació:

$$\Delta I = \frac{fmm_f - fmm_i}{N_{v_{on}} \cdot N_{c_{on}}} \quad (5.35)$$

on  $N_{v_{on}}$  i  $N_{c_{on}}$  són el nombre de voltes per capa i de capes de la bobina que està en funcionament, i  $fmm_f$  i  $fmm_i$  són la força magnetomotriu final i inicial, respectivament.

### 5.4.7 Permeàmetre simètric

Si el mètode de mesura són els *steps*, el cas és anàlog al que s'acaba d'explicar, amb la particularitat que la magnitud de la *fem* és el doble.

Existeix un cas quan es fan les mesures amb el mètode de les inversions en què la *fem* no es pot calcular amb la fórmula (5.32), i és quan N1 i N2 es fan servir, (per tant s'han d'invertir) alhora. En aquest cas, la variació de la *fmm* és la següent:

$$fmm(t) = \begin{cases} (N_{v_1} \cdot N_{c_1} + N_{v_2} \cdot N_{c_2}) \cdot SR \cdot t & \text{si } t \leq t_{N2} \\ N_{v_1} \cdot N_{c_1} \cdot SR \cdot t & \text{si } t_{N2} < t \leq t_{N1} \end{cases} \quad (5.36)$$

on  $t_{N1}$  i  $t_{N2}$  són els temps que triga a estabilitzar-se el corrent de cada bobina. La variació de corrent en cada bobina s'ha de calcular per separat amb l'equació (5.37). A partir d'aquí es poden trobar  $t_{N1}$  i  $t_{N2}$ .

El que succeeix és que la *fem* pren dos valors diferents durant el canvi de corrent. L'únic cas d'interès en què es produeix aquesta situació és quan es fa la mesura d' $H$  màxim, però com que en aquest punt de la corba  $I_{N1} \approx I_{N2}$ , la *fem* és quasi constant fins a l'instant final.

Si només N1 o N2 estan enceses, llavors la variació de corrent es pot calcular de la següent

<sup>7</sup>En realitat, per a camps molt baixos aquesta afirmació no és certa, ja que s'ha comprovat que a la regió inferior de la corba BH no existeix una relació lineal entre la magnitud d' $H$  i el corrent de magnetització.

manera:

$$\Delta I = \frac{2 \cdot f m m_f}{N_{v_{on}} \cdot N_{c_{on}}} \quad (5.37)$$

on  $N_{v_{on}} \cdot N_{c_{on}}$  són les voltes de la bobina per la qual circuli corrent.

S'estudien els casos en què es va de  $-H_{mín}$  a  $H_{mín}$  i de  $-H_{màx}$  a  $H_{màx}$ .

### Espectre freqüencial del senyal H

Amb la bobina H pot ser més limitant l'ample de banda del senyal, ja que els temps en què la  $fem$  varia són considerablement més petits que els de la bobina B. Succeeix el mateix amb la magnitud de la  $fem$ , cosa que obliga a amplificar el senyal, però com més gran sigui el guany de l'amplificador més estret és l'ample de banda.

Tal i com s'ha fet amb la bobina B, s'han agafat alguns dels pitjors casos i se n'ha fet un estudi.

## 5.5 Disseny del circuit secundari

En els apartats anteriors s'han fet un seguit d'anàlisis i de càlculs per conèixer el rang de magnituds que pot adoptar la  $fem$  a les bobines B i H. Però d'aquest senyal no es poden deduir ni la densitat de flux magnètic ni la intensitat de camp del punt mesurat. El que cal és un dispositiu que integri el voltatge als terminals de les bobines secundàries per tal de *recuperar* la variació original de  $B$  i  $H$ .

Aquest procediment es pot fer tan digitalment com analògica, però en aquest treball s'ha optat per la darrera opció, ja que (seguint l'argument de Forillo [3]) no es considera que els temps d'integració siguin prou grans perquè les inexactitud en les mesures causades per la deriva dels amplificadors acabin sent significatives.

Per tal de prevenir la situació descrita es prenen encara dues precaucions més:

- S'escullen amplificadors operacionals amb control de la deriva (*zero-drift*).
- Després de cada mesura es ressetejaran tots els integradors alhora.

Tal i com mostra la següent equació, integrant la  $fem$  entre dos instants de temps s'obté la variació de flux a la bobina secundària:

$$\Phi(T + t_0) - \Phi(t_0) = \Delta\Phi = \int_{t_0}^{T+t_0} fem dt \quad (5.38)$$

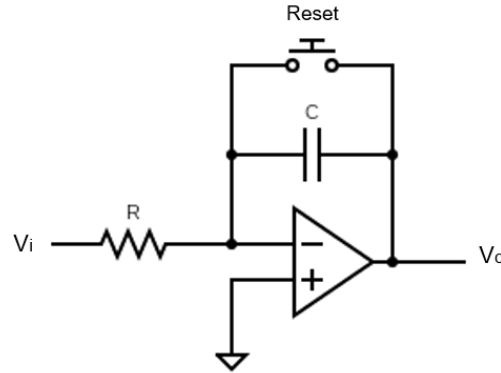


Figura 5.12: Integrador analògic.

I per tant,  $\Delta B$  es pot calcular segons l'expressió (5.39)

$$\Delta B = \frac{1}{N_b \cdot A} \int_{t_0}^{T+t_0} fem(t) \quad (5.39)$$

A la figura (5.12) es mostra l'esquema electrònic d'un integrador analògic. Es pot afegir una resistència a l'entrada no inversora de l'amplificador per compensar els corrents de polarització. En sèrie amb la resistència  $R$  hi ha la resistència del fil de la bobina, que pel seu baix valor és negligible en el disseny.

La caiguda de tensió a la sortida de l'integrador es pot calcular de la següent manera:

$$V_o = \frac{1}{G} \int_{t_0}^{T+t_0} V_i dt + V_0 = \frac{1}{(R + R_{fil}) \cdot C} \int_{t_0}^{T+t_0} V_i dt + V_0 \quad (5.40)$$

on  $G$  és el guany de l'integrador<sup>8</sup>. Aquest voltatge  $V_o$  és igual a  $\Delta\Phi \cdot G$ , i  $V_i$  és la  $fem$ .  $V_0$  és la tensió a la sortida de l'integrador a l'instant  $t = 0$ .

La mesura del voltatge a la sortida de l'integrador es farà amb l'oscil·loscopi de 4 canals R&S®RTO2034 de 3 MHz, amb què ja compta el laboratori de mesures magnètiques. Hi ha tres senyals en total: un de  $B$  i dos d' $H$  (aquests últims idealment molt similars), perquè tal i com s'ha explicat es col·locaran dues bobines planes per mesurar la intensitat de camp.

<sup>8</sup>Si l'integrador té més d'una etapa per amplificar el senyal,  $G$  és igual al producte dels guanys de totes les etapes.



### 5.5.1 Procediment

Per seleccionar els integradors se segueix un criteri basat en la reducció de l'*offset*, la compensació de la deriva (amplificadors *zero-drift*) i les magnituds de la *fem* i del voltatge de sortida. Per aquest motiu s'escullen amplificadors operacionals de Texas Instruments de la categoria de *precision Op-Amps*. El guany de l'amplificador el limita la màxima amplitud que pot tenir el senyal de sortida sense que la resposta sigui no lineal; per tant, per conèixer el guany més gran a què es pot aspirar cal saber la tensió de sortida  $V_o$  màxima amb  $G = 1$ .

Amb el programa *PSpice for TI*, que Texas Instruments va llançar gratuïtament fa poc, es fan simulacions amb l'ànim de comparar les respostes de diversos models d'amplificador de característiques diferents per veure quin respon millor. Es realitzen dos experiments per bobina: un per quan la variació de  $B$  i  $H$  són màximes i l'altre quan són mínimes, procurant que coincideixin també amb els màxims i mínims de la *fem* inicial. D'aquesta manera es cobreix tot el rang de voltatges d'entrada i de sortida i es pot garantir que el disseny funcionarà per tots els punts de la corba BH. A partir de les simulacions s'ajusten  $R$  i  $C$  i si cal s'afegeix una resistència a l'entrada no inversora fins arribar a una solució de compromís entre els dos experiments descrits.

### 5.5.2 Senyal de la bobina B

Per tal de dissenyar l'integrador del senyal de  $B$  cal, primer, modelitzar un sistema que generi una *fem* exactament igual a l'estudiada als apartats anteriors. En aquest cas, es tracta d'un senzill sistema de primer ordre format per una resistència  $R_{\tau}$  i un condensador de capacitància  $C_{\tau}$ , de tal manera que  $R_{\tau} \cdot C_{\tau}$  és igual a la constant de temps  $\tau$  del sistema. L'entrada és un pols quadrat que va de 0 V a la  $fem_{màx}$  en els dos casos més limitants ( $fem_{màx} = 16$  V i  $fem_{màx} = 0.078$  V). La durada d'aquest pols ha de ser prou llarga perquè el senyal ja estigui estabilitzat quan l'entrada torni a 0 V. A la figura (5.13) es mostra l'esquema electrònic del model descrit. És necessari l'ús d'un seguidor de tensió per evitar que la caiguda de tensió a la resistència es modifiqui en incorporar elements al model. A més, s'ha hagut d'implementar un amplificador inversor (ideal) per tal que el senyal s'inverteixi dues vegades: abans d'entrar a l'integrador inversor i durant la integració. A la pràctica, la connexió del dispositiu es realitzarà de tal manera que l'entrada inversora de l'integrador enllaci amb el terminal negatiu de la bobina B.

Com que dels resultats de l'apartat 6.3.2 es coneix que la *fem* a la bobina B pot arribar a magnituds de fins a 16 V, cal buscar amplificadors amb tensions d'alimentació

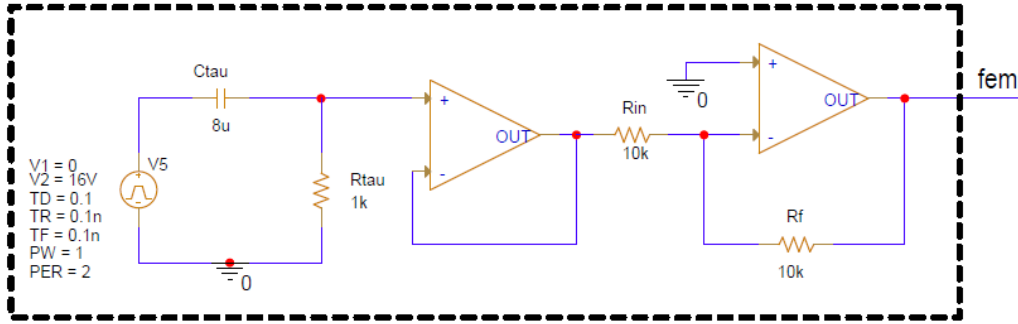


Figura 5.13: Esquema electrònic del model que genera una fem de les mateixes característiques que la bobina B. S'ha creat amb el programa Pspice.

elevades.

Per tal de determinar el guany desitjat s'ha de conèixer el voltatge màxim que hi haurà a la sortida de l'amplificador operacional en els dos casos estudiats. A continuació es fa el càlcul analític d'aquest voltatge.

Combinant les equacions (5.29) i (5.38) s'arriba a la següent expressió:

$$\Delta\Phi = \int_{t_0}^{T+t_0} A \cdot e^{-t/\tau} dt \quad (5.41)$$

on  $A$  es calcula segons la fórmula (5.30) i coincideix amb la fem màxima de cada senyal. Suposant que  $t_0 = 0$ , la integral passa a ser la següent:

$$\Delta\Phi = \int_0^T A \cdot e^{-t/\tau} dt = A \cdot \tau \cdot (1 - e^{-T/\tau}) \quad (5.42)$$

Per a  $T \gg t_0$  i superior a  $5\tau$ , el segon terme és molt petit i el resultat es pot aproximar a:

$$\Delta\Phi = A \cdot \tau \quad (5.43)$$

I, com que  $\Delta\Phi$  és igual al voltatge de sortida, la tensió màxima es pot trobar a partir d'aquesta expressió.

Quan la variació de  $B$  és màxima aquest voltatge és de 127.9 mV, i en el cas contrari és de 14.9 mV. Per assegurar que els senyals es poden visualitzar correctament amb un oscil·loscopi, es desitja un guany  $G = 10$ .

Es presenta un sol disseny per ambdós permeàmetres.

### 5.5.3 Senyal de la bobina H

En aquest cas el que es vol conèixer és  $H$ , i per tant l'equació (5.39) passa a ser la següent:

$$\Delta H = \frac{1}{N_b \cdot A \cdot \mu_0} \int_{t_0}^{T+t_0} fem \, dt \quad (5.44)$$

La  $fem$  de la bobina H té forma quadrada. L'entrada del circuit simulat amb el PSpice és, per tant, un pols de 0 V a la  $fem$  amb una durada igual al temps des de l'inici fins al final de la rampa de corrent.

El factor limitant del senyal d' $H$  és la gran amplitud del rang de la  $fem$ , motiu pel qual poden sorgir més problemes de precisió que amb el senyal de  $B$ . En aquest cas, determinar el voltatge a la sortida de l'integrador amb  $G = 1$  és molt senzill: és l'àrea del senyal quadrat de la  $fem$ , és a dir,  $fem_{màx} \cdot \Delta t$ , on  $\Delta t$  és el temps que dura el canvi de corrent. Quan  $\Delta H$  és màxima la tensió de sortida és igual a 2.81 mV. Quan la variació és mínima,  $V_{o_{mín}}$  és igual a 0.5175  $\mu$ V. El problema és evident: perquè en la conversió d'anàlogic a digital a l'oscil·loscopi el senyal del voltatge a la sortida de l'integrador es pugui recuperar correntament, ha de ser almenys de l'ordre de 100 mV. Però si s'amplifica prou per arribar a aquesta magnitud, llavors  $V_{o_{màx}}$  supera de llarg la tensió de sortida màxima de l'operacional.

Una manera pràctica (tot i que no exempta de riscos) de solucionar aquesta situació és fer que el guany de l'amplificador sigui variable, posant, per exemple, un interruptor selector que permeti connectar diferents resistències a l'entrada inversora de l'integrador, segons la zona de la corba de magnetització o d'histeresi en què es trobi el següent punt a mesurar.

El principal desavantatge d'aquesta solució és que abans de l'anàlisi el material magnètic de la mostra no està caracteritzat, i per tant no es pot preveure amb exactitud com de significatiu és el següent salt d' $H$  ni quan es saturarà l'amplificador. Tot i així, sí que es pot aproximar  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  a partir del corrent de magnetització. Controlar a ull la magnitud i l'augment del voltatge de sortida en cada mesura també és un bon mètode per evitar la saturació de l'integrador: quan sobrepassi un cert valor, es canvia el guany del circuit. S'ha de tenir en compte que la variable  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  no té tanta incertesa com  $\frac{dB}{dt}$  perquè el rati de canvi d' $H$  depèn de l'*slew rate* de la font. Es considera que hi ha prou raons de pes per optar per aquest mètode si es prenen les precaucions mencionades.

## 5.6 Consideracions finals

Pel rumb que ha pres el treball en aquests últims apartats, consistent en la comparació continuada del permeàmetre asimètric amb el simètric a través de diversos anàlisis, es creu pertinent resumir i explicitar els avantatges i desavantatges d'ambdós models com un pas previ a les conclusions.

Els rangs de mesura són els següents:

- Permeàmetre asimètric: 0.002 kA/m - 26 kA/m
- Permeàmetre simètric: 0.002 kA/m - 25 kA/m

El permeàmetre *asimètric* dissenyat presenta un avantatge molt important en l'aspecte mecànic, i és que la fixació de la mostra és més directa i correcta. Per la naturalesa teòrica del projecte no s'ha pogut comprovar l'efecte negatiu d'un contacte deficient entre la mostra i el nucli, però en base a la bibliografia consultada es creu molt important. Per altra banda, la geometria asimètrica requereix només una meitat de *yoke*, cosa que suposa un abaratiment del pressupost. Aquestes dues primeres consideracions són anteriors als anàlisis magnetoestàtic i dinàmic.

Potseriorment, s'ha comprovat que la presència dels corrents de Foucault amb el mètode de les inversions de corrent incideix molt negativament a les mesures de  $B$  i  $H$ , per la qual cosa el permeàmetre asimètric sols es pot operar amb el mètode dels *steps*. Es necessiten dues fonts de corrent CAENels del laboratori de mesures magnètiques per fer funcionar el permeàmetre, una per a cada bobina de magnetització.

Mecànicament, el permeàmetre *simètric* presenta certes complicacions relacionades amb el contacte entre la mostra i el nucli. A més, al contrari del que es creia inicialment, s'ha comprovat que l'uniformitat de flux a la mostra es veu més compromesa amb aquest model, tot i que a la pràctica aquesta desviació és negligible i no suposa una problemàtica greu.

A causa de l'ampli rang de la *fem* induïda a la bobina B, el circuit secundari del permeàmetre simètric ha presentat un repte de disseny considerable. Tot i així, l'ús d'aquesta geometria és l'única manera de garantir que els corrents de Foucault no tindran cap incidència sobre les mesures preses. S'ha pogut concloure que és perfectament factible l'ús del mètode de les inversions, i també es pot fer servir el dels *steps*. Per això s'han dissenyat dues bobines B que es construïran sobre formes no magnètiques de tal manera que es puguin intercanviar entre elles. El desavantatge més important que presenta el model

simètric és que, com que el bobinat de magnetització té el doble de voltes, per a corrents de més de 1.24 A la resistència de la bobina N2 provoca una caiguda de tensió superior als 20 V. Això vol dir que no es poden utilitzar les fonts de CAENels FAST-PS 3020-600 del laboratori de mesures magnètiques. Les úniques opcions són comprar una altra font (per exemple, una FAST-PS 2040-600) o demanar-ne una a un altre laboratori d'ALBA.

Més enllà d'aquestes consideracions, la valoració d'ambdues alternatives és molt relativa al context en què es farà servir aquest permeàmetre i a la forma de treballar del personal d'ALBA. Amb això en ment, la decisió de quin dels dos permeàmetres s'acabarà construïnt es delega a ALBA. El projecte proporciona la informació necessària perquè el client pugui fer aquesta elecció sense recórrer a fonts externes.

A l'apartat 4 del document d'Annexos es pot consultar una breu guia d'ús del permeàmetre en què, entre d'altres coses, es presenta l'equació per extrapolar  $H$  a partir de les dues bobines planes i calcular  $B$  considerant el flux de l'aire.



# Capítol 6

## Resultats

### 6.1 Anàlisi magnetoestàtic

#### 6.1.1 Primer grup

A la taula (6.1) es mostra un resum dels resultats de les simulacions. Inclou la següent informació per a cada experiment:

- El número de la simulació.
- El nombre de voltes de la bobina de magnetització i la secció del fil.
- El material del *yoke*.
- Les dimensions de la barra (*gruix x llargada*), en mm.
- El rang de  $B$  mesurat al centre de la mostra.
- El rang d' $H$  mesurat al centre de la mostra.
- El rang de permeabilitat al centre de la mostra.
- El rang de la diferència de flux entre el centre del *yoke* i el centre de la mostra.
- El rang de la densitat del corrent de magnetització.

A l'apartat 3.1.1 dels Annexos es poden consultar les taules que contenen tota la informació extreta de les simulacions. Hi ha 3 taules per cada simulació.

Núm. sim.	Característiques de la simulació				Rang $B_0$ mostra [T]	Rang $H_0$ mostra [A/m]	Rang $\mu_r$ mostra	Rang $B_{\max}$ yoke [T]	Dif. flux (%)
	Rang fmm [A·volta]	Material (yoke)	Material (mostra)	Dim. Mostra [mm]					
1	12.7 - 1016	Permendur	Permendur	3x240	0.74 - 2.22	58 - 1338	10139 - 389	0.094 - 0.363	0.5 - 22
2	13 - 520	Permendur	Permendur	3x240	0.75 - 2.21	59 - 2362	10112 - 746	0.095 - 0.322	0.4 - 12.3
3	13 - 520	Ferro	Permendur	3x240	0.51 - 2.12	4 - 1335	10722 - 1263	0.015 - 0.291	0.6 - 7.2
4	3.175 - 253	Permendur	Permendur	3x240	0.19 - 2.12	14 - 1338	10695 - 1260	0.022 - 0.241	0.37 - 6.92
5	3.175 - 253	Permendur	Permendur	6x240	0.16 - 2.12	12 - 1330	10705 - 1267	0.041 - 0.493	(-0.08) - 3.26
6	3.175 - 254	Permendur	Permendur	3x320	0.19 - 2.12	14 - 1335	10695 - 1246	0.025 - 0.287	0.24 - 5.43
7	3.175 - 255	Permendur	M270-50	3x240	0.03 - 1.58	17 - 1329	2228 - 948	0.004 - 0.222	5.9 - 9.1

Taula 6.1: *Taula resum dels resultats de les simulacions del primer grup. Dels resultats es destaca l'insuficient rang d' $H$  i de  $B$  a la mostra*

## Anàlisi dels resultats

La primera conclusió que s'extreu d'aquest grup de simulacions és que el rang de mesura és insuficient.

Així, la  $fmm$  de totes les simulacions no és prou significativa per arribar a intensitats de camp de més de 4500 A·volta en el millor dels casos (concretament a la simulació 1). Per a la resta,  $H$  màxim pot arribar a ser quatre vegades més petita. La mostra de Permendur s'arriba a saturar només a la simulació 1, però amb aquesta intensitat de camp un altre material com el M1200-100 encara es trobaria a la zona lineal de la corba de magnetització.

Aquesta problemàtica no afecta només el límit superior del rang, tot i que per les baixes forces magnètiques al nucli és evident, sinó també al límit inferior. Si no fos així només caldria afegir més voltes. Per exemple, es pot veure que a les simulacions 1, 2 i 3 el camp mínim supera considerablement l'acordat i en el primer punt de mesura el material es troba en una zona no lineal.

Sempre i quan es vulgui mantenir la configuració proposada amb una sola bobina de magnetització enrotllada uniformement al *yoke* existirà aquest problema. Per aquest motiu és estrictament necessari un replantejament de l'estructura del circuit primari, tot i que això suposi allunyar-se de les premisses estipulades pels tipus de permeàmetre estudiats. D'altra manera s'hauria d'escollir entre arribar a forces magnètiques més elevades sacrificant els primers punts de la corba BH o mesurar només les densitats de flux magnètic més baixes, abandonant així la possibilitat d'obtenir la corba d'histeresi.

En segon lloc, dels resultats es pot extreure que per maximitzar l'eficiència del permeàmetre s'ha de trobar un punt d'equilibri entre la magnetització del *yoke* i la seva



saturació magnètica. Com més fàcilment es magnetitzi més força magnètica podrà aportar a la mostra, però quan s'acosti al seu punt de saturació aquesta aportació s'anirà veient reduïda fins a un valor mínim. En els resultats s'ha vist que el *yoke*, degut a les seves dimensions, triga molt a magnetitzar-se, i no s'ha detectat que s'arribés a saturar en cap simulació.

Per altra banda, si la mostra és massa prima corre el risc de saturar-se massa ràpid, amb la qual cosa es perdrien punts baixos i intermitjos de la corba de magnetització. Com amb el *yoke*, és important que les seves dimensions afavoreixin un equilibri entre la seva magnetització i la seva saturació.

Les pèrdues de flux disminueixen considerablement per a un gruix de la mostra més gran, un bon incentiu per augmentar aquesta mida. A la figura (6.1) es mostra una comparació de les pèrdues de flux per a les barres de les simulacions 4, 5 i 6; és a dir, una corba per un gruix i llargada estàndards, una per a més gruix, i una per a més llargada.

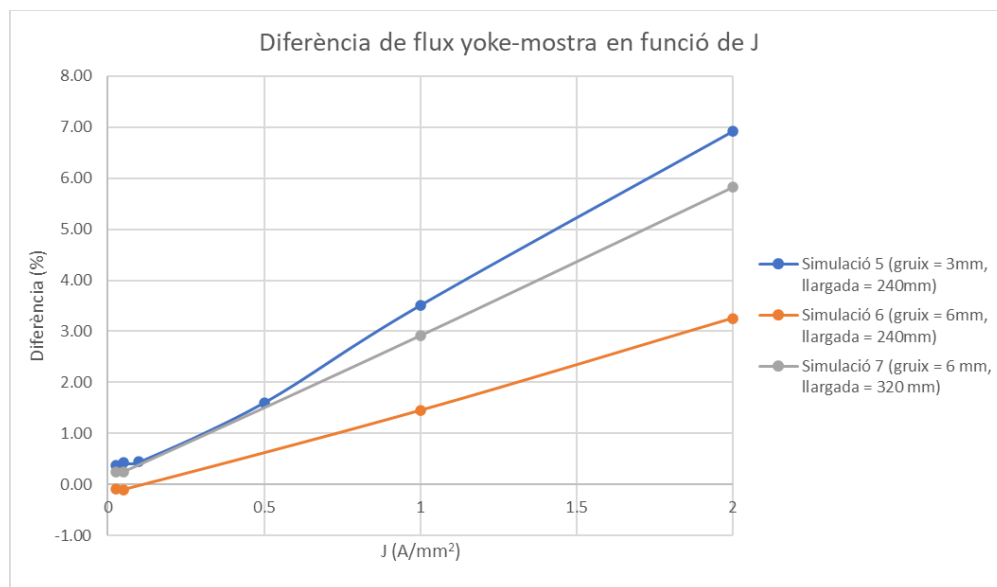


Figura 6.1: Comparació de la diferència percentual de flux entre el yoke i la mostra per les simulacions 4, 5 i 6.

S'observa també que les pèrdues disminueixen amb la llargada, tot i que menys que per al gruix, sobretot tenint en compte que la llargada de la mostra de la simulació 7 és 1.33 vegades més gran que la de la simulació 5 i pot representar un inconvenient físic. Es desestima, doncs, la possibilitat de fer servir barres més llargues. En canvi, es proposa fer la barra més gruixuda que els 3 mm que s'havien estipulat en aquest grup de simulacions.

### 6.1.2 Segon grup: permeàmetre asimètric

Les simulacions del segon grup es divideixen en dos blocs. A les taules (6.2) i (6.3) es mostra un resum dels resultats de les simulacions per cada material. Es pot veure el següent:

- Rang de la força magnetomotriu en A · volta. No es tracta d'un resultat, sinó d'un paràmetre de la simulació.
- Rang de la densitat de flux magnètic al centre de la mostra en T.
- Rang de la força magnètica al centre de la mostra en A/m.
- Rang de la permeabilitat al centre de la mostra en H/m. Per l'ARMCO i M270-50 hi ha tres valors, ja que la corba de permeabilitat experimenta un màxim per forces magnètiques mitjanes.
- Pendent de la recta de tendència que relaciona  $H$  al centre de la mostra amb la força magnetomotriu aplicada.

Per a les simulacions del tercer bloc s'avalua també la densitat de flux magnètic màxima al *yoke*.

Als Annexos, a l'apartat 3.1.2, es mostren els resultats dels blocs 1, 2 i 3 per cada densitat de corrent. Les caselles en groc indiquen que l'anàlisi no ha convergit en aquell punt.

#### Bloc 1

Observant els rangs de mesura de les simulacions 1, 2, 3 i 4 a la taula (6.2) es veu d'immediat que només s'arriba a la densitat de flux magnètic desitjada amb ARMCO i Permenur.

És un resultat esperable tenint en compte que els experiments d'aquest bloc parteixen d'un desconeixement parcial del comportament del nou circuit magnètic i que s'ha escollit un nombre arbitrari de voltes a les bobines de magnetització.

Les rectes de tendència que relacionen la força magnetomotriu i la força magnètica s'ajusten a les dades per camps grans. No obstant això, en els primers punts de la corba de magnetització, quan  $H$  pren valors molt petits, no és possible trobar una relació entre ambdós paràmetres.

Si bé a causa la manca de punts simulats no es pot assegurar que el valor del pendent de la recta sigui exacte, gràcies a la linealitat de la funció  $H = f(fmm)$  als punts més alts de la

corba aquest recurs pot ser molt útil per dimensionar les bobines de magnetització.

Així doncs, s'estipula que la relació  $H/fmm$  és d'aproximadament 4-4.5.

Resum dels resultats de les simulacions (grup 2, bloc 1)						
Núm. sim.	Material (mostra)	Rang fmm [A·volta]	Rang $B_0$ (mostra) [T]	Rang $H_0$ (mostra) [A/m]	Rang $\mu_{r0}$ (mostra) [H/m]	m ( $H_0$ vs. fmm)
1	M270-50	10.2 - 844	0.03 - 1.71	17.62 - 4047.69	1451 - 2553 - 335	4.803
2	Permendur	10.2 - 844	0.05 - 2.22	3.94 - 3469.04	10721 - 511	4.227
3	M1200-100	10.2 - 844	0.05 - 1.67	6.13 - 2989.42	6400 - 446	4.4
4	Armco	10.2 - 844	0.02 - 1.47	29.21 - 3479.64	518 - 2662 - 335	4.22

Taula 6.2: Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 1 del segon grup.

## Bloc 2

Mirant la taula (6.3) es pot comprovar que els rangs de mesura d'aquests experiments sí que es corresponen amb els desitjats. Per tant, en aquest sentit es pot afirmar que el model dissenyat és vàlid.

Resum dels resultats de les simulacions (grup 2, bloc 2)							
Núm. sim.	Material (mostra)	Rang fmm [A·volta]	Rang $B_0$ (mostra) [T]	Rang $H_0$ (mostra) [A/m]	Rang $\mu_{r0}$ (mostra) [H/m]	m ( $H_0$ vs. fmm)	$B_{m\grave{a}x}$ (yoke) [T]
5	M270-50	6.2 - 4800	0.01 - 1.89	18.83 - 19274.80	427 - 6519 - 78	4.0785	1.26
6	Permendur	6.2 - 3600	0.02 - 2.23	1.98 - 14649.92	10721 - 121	4.0565	1.26
7	M1200-100	12.4 - 6310	0.07 - 2.03	8.29 - 26204.1	6400 - 62	4.2539	1.45
8	ARMCO	6.2 - 4800	0.01 - 1.49	18.84 - 19441.31	431 - 6519 - 61	4.0522	1.11

Taula 6.3: Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 2 del segon grup.

A les figures (6.2), (6.3), (6.4) i (6.5) es mostra una comparació de les corbes teòriques amb les simulades. Aquestes imatges no aporten informació nova, però són una eina molt útil per visualitzar els rangs de mesura del permeàmetre.

S'hi pot apreciar que per als materials M270-50, ARMCO i Permendur els punts més alts de la corba superen els teòrics en magnitud. No succeeix el mateix amb el M1200-100, però la densitat de flux magnètic màxima arriba a la desitjada.

Per tal de magnetitzar el M1200-100 per sobre de 2 T és necessària una força magnetomotriu molt gran (d'uns 6310 Avolta) comparada amb la dels altres materials.

No és possible arribar a aquestes forces amb només una de les bobines de magnetització; ha de circular el corrent màxim per N1 i per N2. Es requereix que ambdues estiguin sincronitzades perquè els canvis de corrent es produeixin alhora. Per a la resta de materials, per arribar a la densitat de flux magnètic màxima només és necessari que estigui en funcionament N2.

Consultant les taules (3.23) i (3.24) als Annexos es pot comprovar que hi ha un marge negatiu entre la  $fmm$  màxima que pot subministrar la bobina N1 i la  $fmm$  mínima de la bobina N2, i per tant no existeix cap salt de  $B$  significatiu entre ambdós valors que pugui causar problemes.

Els resultats de la densitat de flux magnètica màxima al *yoke* mostren que es troba saturat per l'últim punt de la corba de magnetització del material M1200-100. Això vol dir que si en el moment de fer les mesures fos desitjable arribar a densitats de flux magnètic més grans dels 2.03 T teòrics, encara que es bobinessin més voltes al nucli la variació de força magnètica aportada a la barra seria mínima, i per tant no seria viable. Aquesta és una de les principals febleses del model asimètric.

Per altra banda, s'observa que per a aquesta configuració el pendent de la recta de tendència entre  $H$  al centre de la mostra i la  $fmm$  pren valors més propers a 4, tot i que són similars als de l'anterior bloc.

Es considera que l'aproximació adoptada ha tingut èxit perquè el permeàmetre dissenyat té els rangs de mesura desitjats per cada material.

El circuit magnètic dissenyat és adequat per a constituir l'esquelet del permeàmetre. Per tant, es procedeix a considerar aquest model com a vàlid i passa a ser motiu de l'estudi dinàmic.

Es conclou que no hi ha motius per provar, simular i analitzar més configuracions del permeàmetre asimètric. Per altra banda, s'ha decidit que el model del permeàmetre simètric imiti en estructura i circuit primari l'estudiat en aquest apartat, cosa que minimitza el temps de simulació i permet fer una comparació més clara i honesta entre els dos.

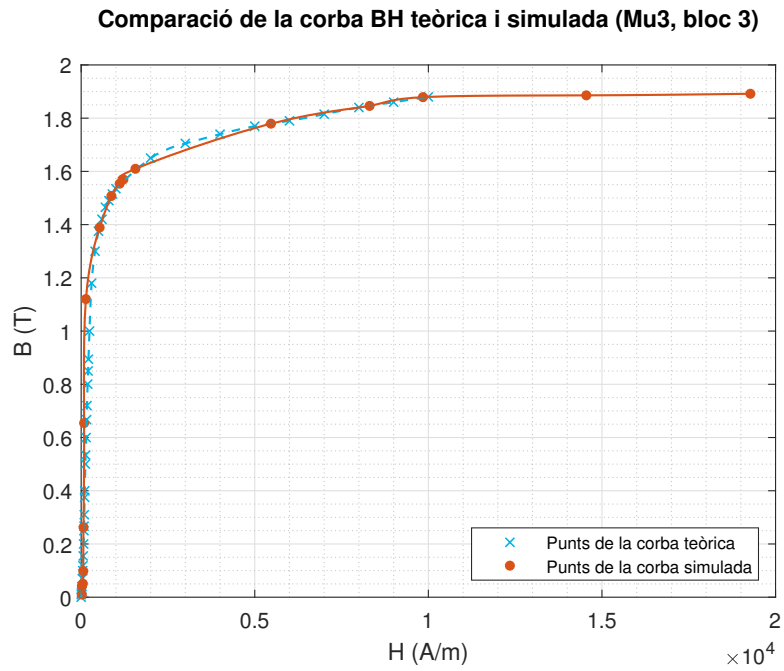


Figura 6.2: Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. M270-50.

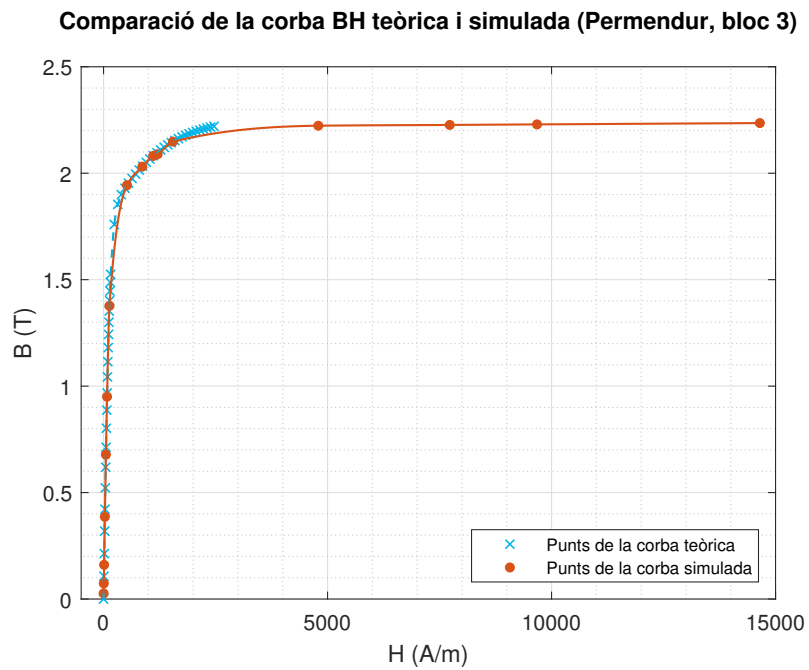


Figura 6.3: Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. Permendur.

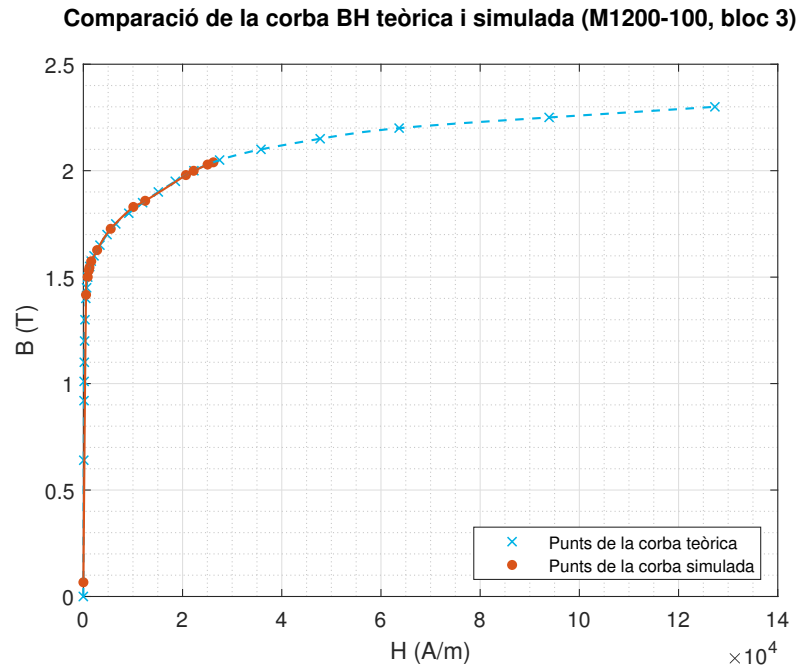


Figura 6.4: Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. M1200-100.

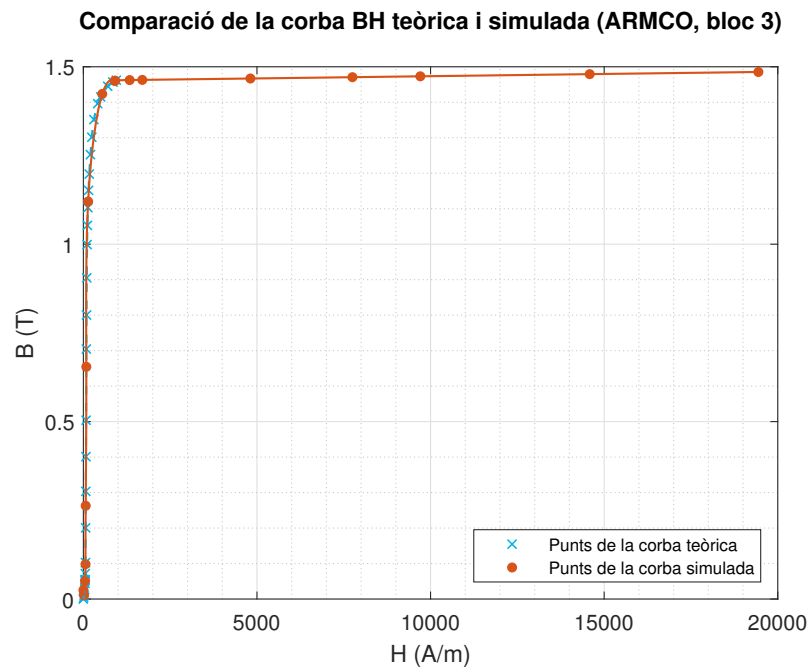


Figura 6.5: Comparació de la corba de magnetització teòrica i simulada. ARMCO.

## Uniformitat d' $H$ i $B$ a la mostra

S'han estudiat els casos en què  $H$  i  $B$  experimenten una diferència més gran entre el centre de la mostra i punts allunyats, propers als extrems. El que s'ha vist és que aquesta diferència és màxima en el punt més alt de la corba BH, quan la força magnetomotriu és màxima. El cas límit és el del M1200-100 i és el que determina la diferència màxima de  $B$  i d' $H$ .

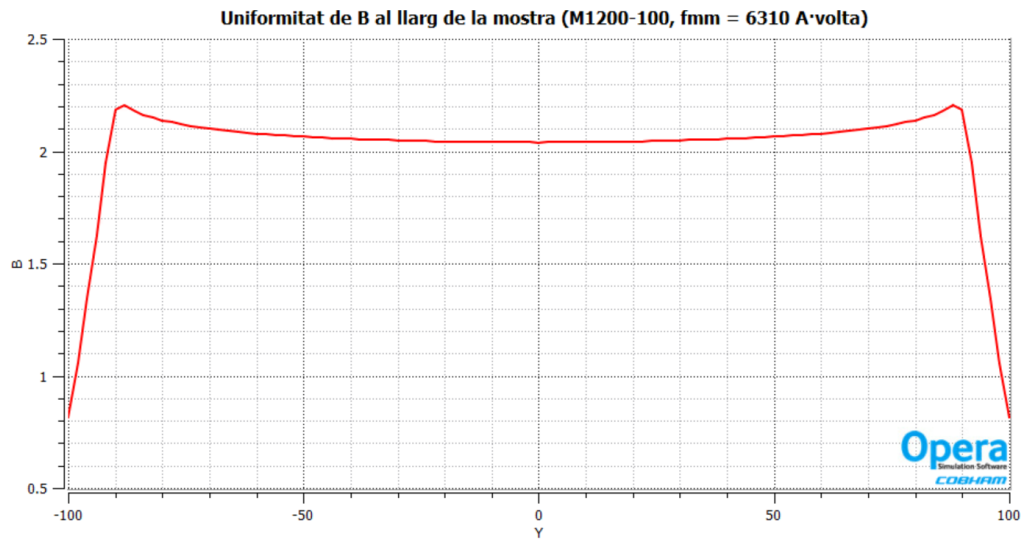


Figura 6.6:  $B$  al llarg de la mostra (M1200-100,  $fmm = 6310$  A·volta).

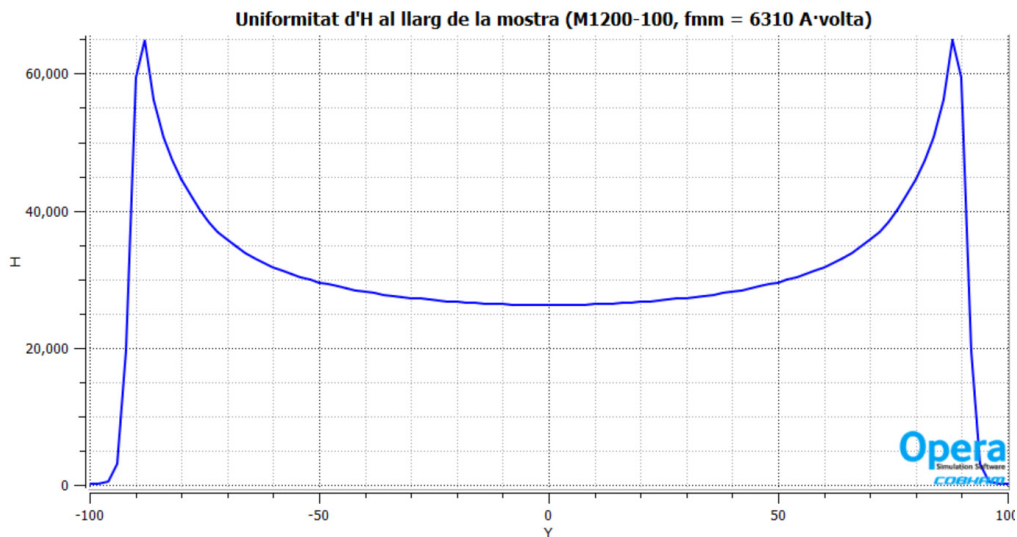


Figura 6.7:  $H$  al llarg de la mostra (M1200-100,  $fmm = 6310$  A·volta).

A la imatge (6.6) es pot observar un exemple de com varia  $B$  al llarg de la mostra amb el aquest material quan  $fmm = 6310$  A·volta, que és la  $fmm$  màxima. La figura (6.7) mostra

la diferència d' $H$  en les mateixes condicions. La diferència més important es dona en els punts més allunyats del centre de la mostra, per la qual cosa no és gaire recomanable que les bobines B i H abastin tota la seva longitud.

S'ha establert una longitud disponible per a les bobines secundàries de 50 mm en total, centrada al punt mig de la mostra, de manera que comença a  $y = -25$  mm i acaba a  $y = 25$  mm.

Per ser precisos en el càlcul la diferència de la densitat de flux i de la força magnètica entre  $y = 0$  mm i  $y = 0$  mm s'hauria de fer servir una expressió matemàticament més acurada que tingués en compte l'àrea de la funció, però pel propòsit estudiat les diferències percentuals es poden calcular segons les següents equacions:

$$Dif.B(\%) = \frac{|B_{m\grave{a}x} - B_{m\grave{i}n}|}{B_0} \cdot 100 \quad (6.1)$$

i

$$Dif.H(\%) = \frac{|H_{m\grave{a}x} - H_{m\grave{i}n}|}{H_0} \cdot 100 \quad (6.2)$$

S'ha vist que al llarg d'aquesta longitud la variació màxima de  $B$  és d'un 0.3%, mentre que la d' $H$  és d'un 2.74%.

Per altra banda, les bobines no agafen la diferència entre els dos punts: integren per a tot el volum del tram que envolten. Per tant, en realitat la diferència calculada sols serveix com a guia per a determinar la longitud de les bobines secundàries.

Es considera que els resultats són acceptables perquè per tots els punts de la corba es compleix que  $dif.B < 1\%$  i que  $dif.H < 5\%$ . La longitud disponible de les bobines B i H es fixa a 50 mm.

### Variació d' $H$ a l'exterior de la mostra

Per a les simulacions del bloc 2 s'ha estudiat com varia  $H$  en la direcció de l'eix de la mostra a l'exterior.

A la figura (6.8) es pot veure com  $H$  disminueix força linealment a la part esquerra de la gràfica, que coincideix amb el costat en què es troba, a una distància més gran que la màxima representada, el *yoke*. De  $x=0$  mm a  $x=5$  mm hi ha la mostra: s'observa que al seu interior la intensitat de camp és uniforme.

Els resultats mostren que és possible fer servir una parella de bobines H planes situades



en qualsevol dels costats de la mostra, però preferentment on hi ha el nucli bobinat, a distàncies curtes.

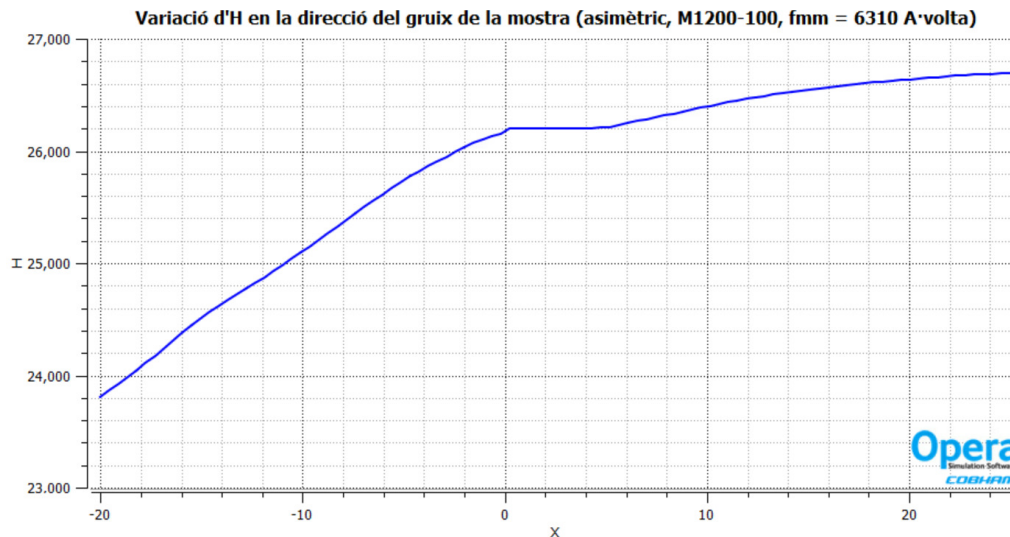


Figura 6.8: Variació d' $H$  en la direcció del gruix de la mostra ( $M1200-100$ ,  $fmm = 6310$  A·volta). Bloc 2 del grup 2 de simulacions.

### 6.1.3 Tercer grup: permeàmetre simètric

#### Bloc 1

Els resultats del bloc 1, resumits a la taula (6.4) demostren que l'hipòtesi inicial que amb una mateixa  $fmm$  el nucli i la mostra es magnetitzen tal com ho fan al permeàmetre asimètric és errònia. El límit superior del rang de mesura queda limitat a 1.87 T, una magnitud insuficient. Se'n poden fer dues interpretacions:

- Hi ha més material al circuit, per la qual cosa costa tant el *yoke* com la mostra costen més de magnetitzar.
- Les línies de flux entren a la mostra des de les dues meitats del *yoke* en sentits oposats. Això fa que algunes d'elles es cancel·lin i dificulta la magnetització del material.

Resum dels resultats de les simulacions (grup 3, bloc 1)						
Material (mostra)	Rang $fmm$ [A·volta]	Rang $B_0$ (mostra) [T]	Rang $H_0$ (mostra) [A/m]	Rang $\mu_{r0}$ (mostra) [H/m]	$m$ ( $H_0$ vs. $fmm$ )	$B_{\max}$ ( <i>yoke</i> ) [T]
M1200-100	554 - 6410	1.56 - 1.87	1731.86 - 13408.18	716 - 111	2.1907	0.639

Taula 6.4: Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 1 del tercer grup.

A la taula (3.25) de l'apartat 6.1.3 dels Annexos es mostren els resultats d'aquest bloc en detall:  $B$ ,  $H$  i  $\mu_r$  al centre de la mostra i la densitat de flux màxima al *yoke* per cada *fmm*.

Es pot veure que el pendent de la línia de tendència és de 2.19, aproximadament la meitat que en les simulacions del segon grup. Per tant, la força magnetomotriu necessària per arribar als valors de camp desitjats és el doble de la simulada en aquest bloc. Això no hauria d'extranyar ja que en tenir el doble de material es necessita el doble de *fmm*.

## Bloc 2

A la taula (6.5) es mostra un resum dels resultats obtinguts. Tal i com s'esperava, amb el doble de la *fmm* de la simulació anterior s'aconsegueix arribar a aproximadament els mateixos punts de la corba que amb el permeàmetre asimètric. S'hi observa que  $B$  i  $H$ , tant mínims com màxims, adopten valors lleugerament més petits. Es considera que el rang de mesura és l'adequat, ja que els mínims són més petits que els desitjats i els màxims més grans.

Com amb les anteriors simulacions, a la taula (3.26) de l'apartat dels Annexos es poden consultar els resultats per cada *fmm*.

Per a aquest model, el *yoke* presenta un estat de magnetització força més baix que treballant amb l'asimètric: 0.972 T respecte 1.45 T amb la *fmm* màxima. Aquest fenomen ja s'ha comentat uns paràgrafs enrere. Malgrat que això suposi la necessitat de treballar amb forces magnetomotrius més altes i per tant amb més bobinat, podria representar un avantatge en el cas que calgués mesurar la permeabilitat d'un material ferromagnètic més dur que el M1200-100, ja que el *yoke* encara pot aportar força més camp.

Tot i que és una possibilitat que no es contempla en aquest treball perquè queda fora de les especificacions del problema, es compta com un punt a favor en l'elecció del model. S'ha de tenir en compte que afegeix certa flexibilitat d'experimentació posterior al disseny teòric.

Resum dels resultats de les simulacions (grup 3, bloc 2)						
Material (mostra)	Rang fmm [A·volta]	Rang $B_0$ (mostra) [T]	Rang $H_0$ (mostra) [A/m]	Rang $\mu_{r,0}$ (mostra) [H/m]	m ( $H_0$ vs. fmm)	$B_{\max}$ ( <i>yoke</i> ) [T]
M1200-100	1100 - 12620	1.62 - 2.03	2686.54 - 25367.8	481 - 64	2.0498	0.972
Permendur	12.4 - 620	0.02 - 2.00	1.73 - 741.19	10722 - 2149	1.117	-

Taula 6.5: Taula resum dels resultats de les simulacions del bloc 2 del tercer grup.

## Uniformitat d'H i B a la mostra

La distribució de  $B$  i  $H$  al llarg de la mostra és molt similar a la que es pot veure a les figures (6.6) i (6.7).

Altra vegada, la longitud disponible de les bobines es fixa a 50 mm centrats al punt mig de la mostra i la diferència màxima correspon a la  $fmm$  màxima aplicada, és a dir, quan és igual a 12620 Avolta i el material és M1200-100. La diferència percentual de  $B$  és del 0.42% i la d' $H$  és del 4.66%. Es compleix que  $diff.B < 1\%$  i que  $diff.H < 5\%$ .

## Variació d'H a l'exterior de la mostra

A la figura (6.9) es pot veure l'evolució d' $H$  en la direcció del gruix de la mostra fins a  $y = \pm 50$  mm. Les dues bobines  $H$  se situaran prou a prop de la mostra per assumir que  $H$  varia linealment amb la distància, ja que en aquests punts la corba es pot aproximar a una recta.

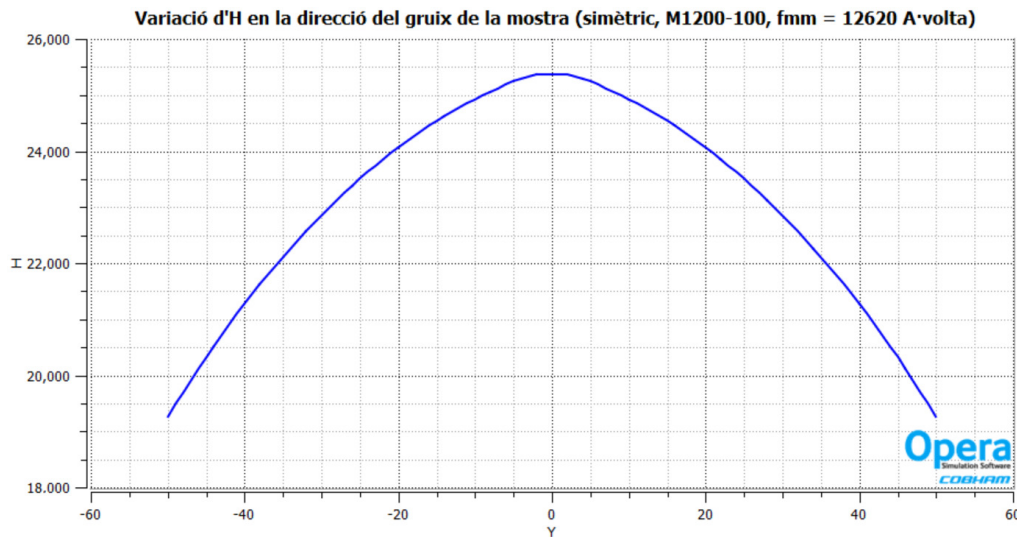


Figura 6.9: Variació d' $H$  en la direcció del gruix de la mostra ( $M1200-100$ ,  $fmm = 6310$  Avolta). Bloc 2 del grup 3 de simulacions.

### 6.1.4 Dimensionament de les bobines de magnetització

A la taula (6.6) es mostren els resultats del càlcul del nombre de voltes, les forces magnetomotrius, les longituds del fil i les superfícies de les bobines N1 i N2 per a ambdós models de permeàmetres. S'hi observa que l'única diferència entre ells és que alguns paràmetres són el doble. A la taula (6.7) es poden veure la resta de càlculs. L'augment de temperatura

Bobines de magnetització (1)			
Paràmetre	Asimètric	Simètric	Unitats
<b>Nombre de capes i de voltes</b>			
$N_{c1}$	1	1	capa
$N_{c2}$	13	13	capes
$N_{c1} \cdot N_{v1}$	135	270	voltes
$N_{c2} \cdot N_{v2}$	2818	5636	voltes
<b>Corrents i forces magnetomotrius</b>			
$J_1 S_1 \text{ màx}$	2.3	2.3	A
$J_2 S_2 \text{ màx}$	2.3	2.3	A
$fmm_1 \text{ màx}$	310.5	621	A·volta
$fmm_2 \text{ màx}$	6481.4	12962.8	A·volta
<b>Longitud del fil</b>			
$L_{fil N1}$	12.04	24.08	m
$L_{fil N2}$	433.61	867.22	m
<b>Superfície de la bobina</b>			
$S_1$	0.041	0.082	m <sup>2</sup>
$S_2$	0.0943	0.1886	m <sup>2</sup>

Taula 6.6: Resultats del càlcul del nombre de voltes i superfícies de la bobina de magnetització per als permeàmetres asimètric i simètric.

no és crític en cap dels casos. S'observa en canvi que la caiguda de tensió a la bobina N2 és força elevada. En el cas del permeàmetre simètric sí que es respecta la limitació dels 20 V fins i tot quan la resistència és màxima a causa de l'augment de temperatura, tot i que no hi ha massa marge. En canvi, el permeàmetre simètric requereix l'ús d'una font d'alimentació que permeti treballar amb un rang de voltatges més ampli. Es proposen la FAST-PS 0540-200 de CAENels, amb una alimentació de  $\pm 5$  A i  $\pm 40$  V o la FAST-PS 0580-400, de  $\pm 5$  A i  $\pm 80$  V.

Una altra solució seria comprar una altra font d'alimentació del mateix model que les del laboratori i alimentar les dues meitats de la bobina N2 de forma separada, amb la qual cosa la resistència es redueix a la meitat i no se superen els 20 V. Aquesta opció implica una sincronització perfecta entre ambdues fonts de corrent, i per tal de mantenir el flux uniforme les variacions de corrent haurien de ser exactament iguals.

Com que de totes maneres s'ha de comprar una font, es recomana la primera alternativa, encara que això vol dir treballar amb voltatges més elevats.

Bobines de magnetització (2)			
Paràmetre	Asimètric	Simètric	Unitats
Resistència del fil			
$R_1$	0.37	0.74	$\Omega$
$R_2$	7.20	14.40	$\Omega$
$R_{1\text{ màx}}$	0.37	0.75	$\Omega$
$R_{2\text{ màx}}$	7.96	15.92	$\Omega$
Variació de temperatura			
$\Delta T_1$	3.26	3.26	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta T_2$	26.94	26.94	$^{\circ}\text{C}$
Tensió i potència consumida màximes			
$V_{1\text{ màx}}$	0.86	1.72	V
$V_{2\text{ màx}}$	18.31	36.63	V
$P_{1\text{ màx}}$	1.98	3.96	W
$P_{2\text{ màx}}$	42.12	84.24	W

Taula 6.7: Resultats del càlcul de la resistència, la variació de temperatura, els voltatges i les potències consumides de la bobina de magnetització per als permeàmetres asimètric i simètric.

## 6.2 Anàlisi dinàmic

### 6.2.1 Evolució dels corrents de Foucault i de B

En aquest subapartat s'analitza l'evolució dels corrents de Foucault i de  $B$  per un exemple en concret; quan s'aplica una rampa de corrent en un temps  $\Delta t = 0.008$  s per assolir un camp de 0.49 T fent servir el permeàmetre simètric. Es recorda que el valor  $\Delta t$  és el resultat de dividir  $\Delta I$  per l'SR de la font d'alimentació, i  $\Delta I$  es coneix dels resultats de l'anàlisi magnetoestàtic amb Opera 2D.

Aquest exemple correspon a un dels casos proposats i serveix per il·lustrar el comportament del permeàmetre en condicions dinàmiques.

A la figura (3.1), a l'apartat 3.2.1 dels Annexos, es mostra l'evolució dels corrents de Foucault en diferents instants. El rectangle central que hi apareix és la mostra; aquestes mides no són les del model, sinó que s'han escalat en la visualització perquè es pugui apreciar millor el que il·lustren. Es poden veure els quatre extrems del *yoke* en contacte amb la mostra. A la part inferior de cada figura hi ha el codi de colors, que ajuda a entendre com es distribueix  $B$  en aquesta regió.

S'hi pot veure com, independentment de l'instant, les densitats dels corrents de Foucault

tenen la mateixa magnitud però sentit oposat a banda i banda de la mostra, i per tant es cancel·len. Això és a causa de la simetria imposada al permeàmetre, i és independent del material de la mostra i del canvi en la magnetització del material. Per tant, en el cas del permeàmetre simètric, aquests corrents parasitaris no juguen cap paper.

Per altra banda, la magnitud d'aquestes densitats de corrent depèn bàsicament del temps de rampeig, del canvi  $\Delta I$  aplicat, i de la conductivitat i permeabilitat de la mostra. En aquest cas s'aprecia que només prenen relativa importància fins a 0.01 s ( $0.127 \text{ A/mm}^2$ ) però que decauen ràpidament ( $0.018 \text{ A/mm}^2$  als 0.05 s) i que a efectes pràctics desapareixen als 0.5 segons ( $\mu\text{A/mm}^2$ ).

Pel que fa a la densitat de flux magnètic, en aquest cas es pot veure que la la mostra està estabilitzada magnèticament als 0.5 s, encara que fins a 1 segon no s'assoleix completament el valor màxim de  $B$  obtinguda a l'anàlisi magnetoestàtic. Això s'observa a la figura (3.2) a l'apartat 3.2.1 dels Annexos i el retard experimentat és a causa que els dominis magnètics evolucionen més lentament que el canvi de corrent. Les parets d'aquests dominis dins del material es mouen més lentament degut al fet que estan sotmesos tant a forces magnètiques com tèrmiques que fan augmentar la fricció interna entre ells.

## 6.2.2 Model asimètric

A les taules (3.27)-(3.31) de l'apartat 3.2.2 dels Annexos es poden consultar els resultats de totes les simulacions pel model asimètric.

A partir dels resultats obtinguts a les simulacions s'estimen les constants de temps per cada cas. A falta d'una quantitat suficient de punts que permeti determinar el temps d'estabilització exacte, s'han interpol·lat les dades de què es disposa i s'ha estudiat a ull quin és el temps en què  $B$  arriba al seu valor final ( $5\tau$ ). Els resultats no són exactes, però l'important és l'ordre de magnitud. Les constants de temps es mostren a la taula (6.8).

Constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre asimètric. Anàlisi dinàmic.		
Material	$\Delta B$ [T]	$\tau$ [s]
Permendur	0.1	0.2
M1200-100	0.1	0.2
Permendur	0.5	0.3
Permendur	2.22	0.008
M1200-100	2	0.05

Taula 6.8: *Resultats de l'anàlisi dinàmic: constants de temps de la funció  $B(t)$ . Permeàmetre asimètric.*

Es constata que el temps d'integració ha de ser al voltant d'1 segon si es vol integrar tot el senyal induït a les bobines secundàries. Encara que els corrents de Foucault influeixin poc en aquest resultat, això no és estrany, ja que succeeix el fenomen que s'ha explicat a l'apartat anterior i que al marc teòric s'ha definit com a difusió.

La figura (6.10) mostra l'evolució de  $B$  en forma del percentatge d'assoliment de la densitat de flux màxima, que és la calculada a l'anàlisi magnetoestàtic amb Opera 2D, per a tres  $B_{m\grave{a}x}$  diferents: 0.1 T (un punt baix de la corba), 0.5 T (un punt situat a la zona lineal de la corba) i 2.2 T (en la zona de saturació). El material és el Permendur, però amb el M1200-100 els resultats segueixen el mateix patró.

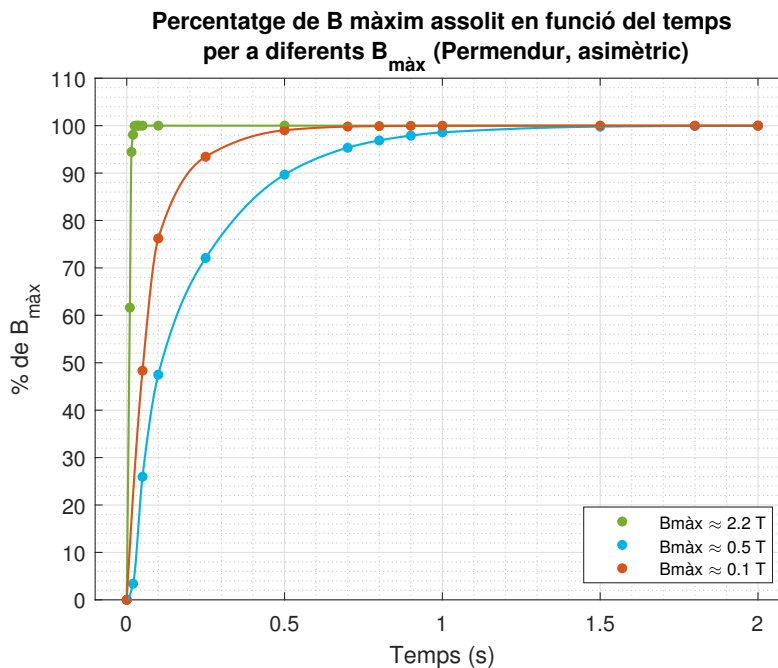


Figura 6.10: *Funció  $B(t)$  en forma del percentatge s'assoliment de  $B_{m\grave{a}x}$  per a tres  $B_{m\grave{a}x}$  diferents: 0.1 T, 0.5 T i 2.2 T (Permendur, permeàmetre asimètric)*

En aquest punt es fa un incís: les corbes de la figura 6.10 no són fàcilment interpretables ni comparables des del punt de vista teòric a causa del temps de canvi del camp magnètic  $\Delta t_h$ , que òbviament no augmenta linealment amb  $\Delta B$ , però, en contra del que inicialment es podria pensar, tampoc amb  $\Delta H$ . Això és degut a l'ús de dues bobines de magnetització diferents i a la quantitat de  $fmm$  que aporta cada una al llarg de la magnetització o histèresi magnètica del material; és a dir, al corrent que hi circula.

Els resultats són útils en tant que permeten dimensionar els components del circuit secundari. A partir d'aquestes corbes és possible conèixer la  $fem$  màxima en cada un dels casos

més limitants, que són els que s'han estudiat en aquest apartat. D'aquí es podrà estimar el rang de la magnitud del senyal a l'entrada del secundari (la *fem*) i a la sortida del mateix. El que importa, doncs, és que es coneixen les dades necessàries per procedir amb el disseny del secundari, un cop s'hagi valorat la presència dels corrents de Foucault.

### Mètode de mesura

Es conclou que amb el mètode dels *steps* les densitats de corrent de Foucault són menyspreables i no exerceixen cap influència en la mesura de la intensitat de camp ni de la densitat de flux a la mostra.

En el cas del mètode de les inversions, les densitats de corrent de Foucault sí que assoleixen valors considerables, fins i tot molt elevats, que fan que els errors en la mesura dels paràmetres magnètics de la mostra siguin rellevants, ja que poden provocar un seguit d'efectes negatius (com la creació d'un camp magnètic contrari a l'aplicat que fa la mesura poc precisa) de gran impacte. És imperatiu evitar aquesta situació, per la qual cosa amb el permeàmetre asimètric no es contempla fer servir el mètode de les inversions per a les mesures.

Al material M1200-100, que és el que requereix de variacions d' $H$  més importants per arribar a les densitats de flux magnètic desitjades, els corrents de Foucault poden arribar a magnituds de milers d'Ampères en tota l'àrea de la superfície de la mostra durant les primeres cenèsimes i mil·lèssimes de segons posteriors a la variació del corrent. La taula (3.31), a l'apartat (3.2.2) del document d'Annexos, conté aquesta informació. És el pitjor cas possible.

### 6.2.3 Model simètric

Els resultats de les simulacions del model simètric es poden consultar a les taules (3.32)-(3.36) del document d'Annexos, a l'apartat 3.2.3.

Constants de temps de la funció $B(t)$ . Permeàmetre simètric. Anàlisi dinàmic.		
Material	$\Delta B$ [T]	$\tau$ [s]
Permendur	0.1	0.06
M1200-100	0.1	0.07
Permendur	0.5	0.08
Permendur	2.22	0.008
M1200-100	2	0.024

Taula 6.9: *Resultats de l'anàlisi dinàmica: constants de temps de la funció  $B(t)$ . Permeàmetre simètric.*



Les constants de temps es poden consultar a la taula (6.9).

Els resultats mostren que pel model simètric la influència dels corrents de Foucault és mínima i els temps d'estabilització són molt baixos en relació als del permeàmetre simètric. Per posar un exemple, en el gràfic de la figura (6.11) es compara la funció  $B(t)$  quan  $B_{0_{m\grave{a}x}} \approx 0.5$  T pel permeàmetre simètric i l'asimètric. La densitat de flux magnètic s'estabilitza molt abans en el cas del permeàmetre simètric.

**Evolució en el temps de B al centre de la mostra (Permendur,  $B_{m\grave{a}x} \approx 0.5$  T)**

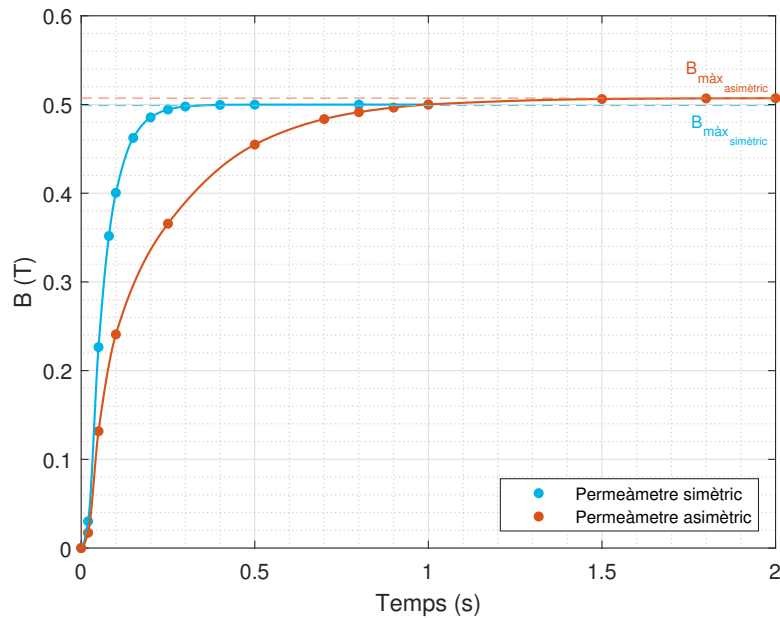


Figura 6.11: *Estabilització de  $B(t)$  per al permeàmetre asimètric i simètric amb valors molt similars de  $B_{m\grave{a}x}$ . Permendur*

A la figura (6.12) s'hi observa una comparació entre comportament dinàmic del permeàmetre simètric i l'asimètric quan el material és M1200-100. En el punt de saturació del material, el temps d'estabilització d'ambdós models és molt similar. El mateix succeeix amb el Permendur.

Altra vegada, no es pretén tan comparar aquests resultats entre ells per interpretar-los profundament a nivell teòric com conèixer les constants de temps per tal de determinar la *fem* al secundari.

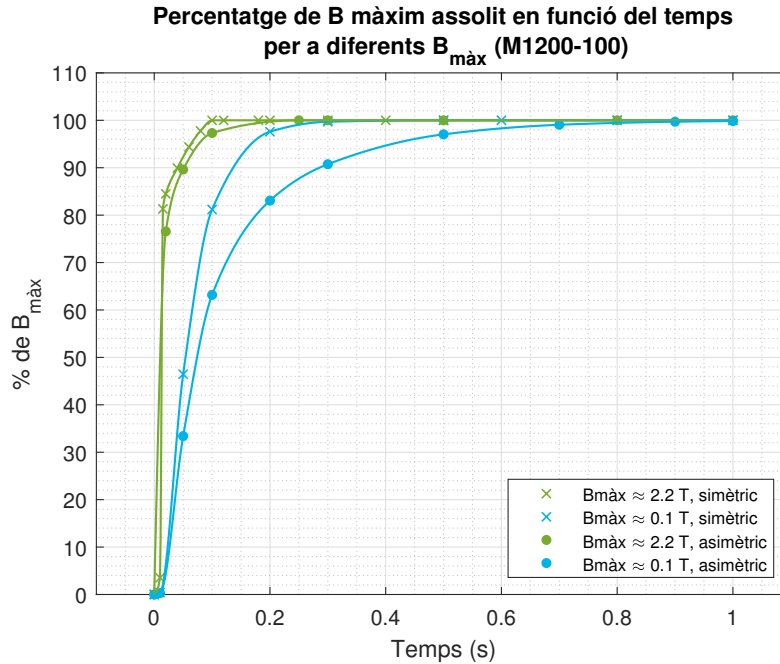


Figura 6.12: Forma de la funció  $B(t)$  en forma del percentatge s'assoliment de  $B_{\text{màx}}$  per a dos  $B_{\text{màx}}$  diferents, segons si el permeàmetre és simètric o asimètric

## Mètode de mesura

Fins i tot utilitzant el mètode de les inversions, els corrents de Foucault són totalment menyspreables, més encara que amb el permeàmetre asimètric fent servir el mètode dels *steps*. Aquesta afirmació se sosté sobre les dades presentades a les taules (3.32)-(3.36) del document d'Annexos.

Amb el material M1200-100 els corrents de Foucault prenen magnituds màximes de mili-amperes en el pitjor dels casos: un factor  $10^6$  més petites que pel permeàmetre asimètric. Amb el Permendur la reducció és 10 vegades més gran.

Per tant, es conclou que amb el permeàmetre simètric es poden fer servir ambdós mètodes de mesura.

## 6.3 Dimensionament de la bobina B

### 6.3.1 Permeàmetre asimètric

Per a aquestes dues simulacions, les característiques de la bobina són les següents:

- Fil: #AWG Metric 2.0
- Secció del fil (sense aïllant):  $S_{fil} = 0.0314 \text{ mm}^2$
- Diàmetre del fil (amb aïllant):  $d_{fil+aïllant} = 0.225 \text{ mm}$
- Secció de la bobina:  $S_b = 191.99 \text{ mm}^2$
- Nombre de voltes:  $N_b = 750$  voltes
- Nombre de capes:  $N_{cb} = 3$  capes
- Longitud total de la bobina:  $L_b = 50.625 \text{ mm}$
- Resistència per  $km$ :  $R_{km} = 212.872 \Omega \cdot km$
- Resistència total del fil de la bobina:  $R_{fil} = 7.166 \Omega$

Els seus valors s'han ajustat mitjançant càlculs analítics respectant en tot moment les restriccions imposades per la disminució de la precisió en la mesura de  $B$  amb l'augment del nombre de capes i per la  $fem$  màxima que podria generar-se en el cas que l'estabilització de  $B$  fos quasi immediata.

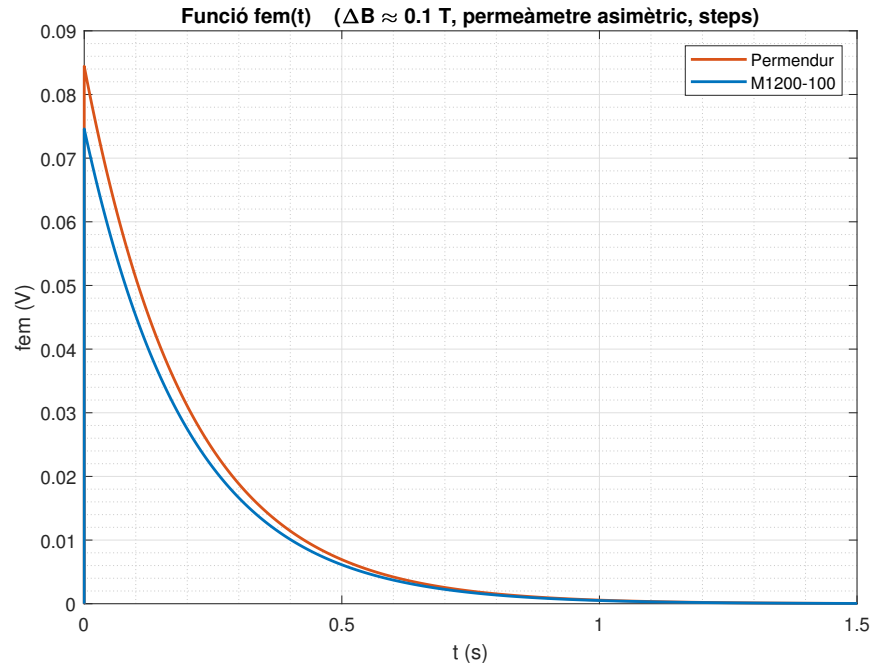


Figura 6.13: Evolució de la fem en el temps (permeàmetre asimètric, mètode dels steps).

A la figura (6.13) es pot apreciar la similitud de les funcions  $fem(t)$  pel Permendur i el

M1200-100. És un resultat esperable, ja que la constant de temps és la mateixa en els dos casos. En base a aquest resultat, s'espera que la *fem* tingui la mateixa forma i les mateixes magnituds en la major part de les mesures.

Per altra banda, s'ha pogut comprovar analíticament que encara que  $T_s = \Delta t_h$  la *fem* màxima no serà mai més gran de 5.52 V. Aquest número sorgeix del càlcul  $N \cdot S_b \cdot (\Delta B / \Delta t_h)^1$  quan el material és el Permendur, ja que  $\Delta t_h$  és mínim a causa de la seva fàcil magnetització.

### 6.3.2 Permeàmetre simètric

#### Mètode dels *steps*

Les característiques de la bobina B són les mateixes que a l'apartat anterior. Aquest cop, la *fem* màxima pren magnituds més grans que en l'apartat anterior perquè el temps d'estabilització és considerablement més baix. Les forces electromotrius resultants de les simulacions es poden veure a la figura (6.14).

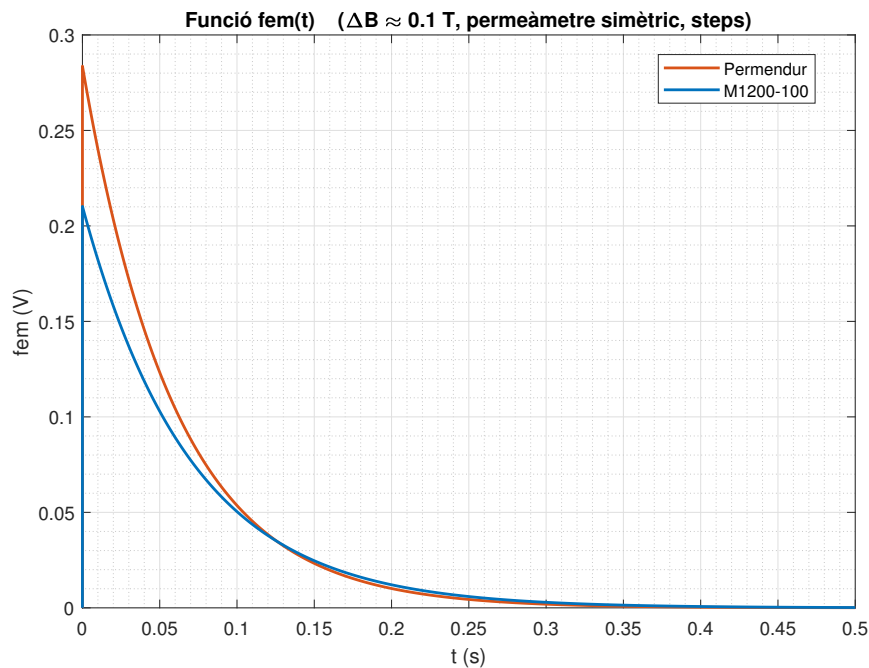


Figura 6.14: Evolució de la fem en el temps (permeàmetre simètric, mètode dels *steps*).

<sup>1</sup>Es pot expressar així perquè en aquest cas la *fem* té forma de rampa.

## Mètode de les inversions

En aquest cas, el nombre de voltes de la bobina B s'ha hagut de reduir considerablement, ja que la *fem* màxima, que es dona quan es fa la inversió de corrent en el punt màxim de la corba BH (en aquest cas del Permendur), presentava valors massa elevats perquè poguessin ser tractats en l'etapa d'integració del senyal.

Les característiques de la bobina B són les següents:

- Fil: #AWG28
- Secció del fil (sense aïllant):  $S_{fil} = 0.08 \text{ mm}^2$
- Diàmetre del fil (amb aïllant):  $d_{fil+aïllant} = 0.34504 \text{ mm}$
- Secció de la bobina:  $S_b = 191.99 \text{ mm}^2$
- Nombre de voltes:  $N_b = 150$  voltes
- Nombre de capes:  $N_{cb} = 1$  capa
- Longitud total de la bobina:  $L_b = 48.381 \text{ mm}$
- Resistència per *km*:  $R_{km} = 555.61 \Omega \cdot \text{km}$
- Resistència total del fil de la bobina:  $R_{fil} = 6.221 \Omega$

El cas límit és el que s'acaba d'explicar, amb una *fem* màxima de 16 V. L'ampli rang de voltatges és el principal problema del mètode de les inversions i el repte de disseny més gran. Per aquest motiu convé escollir un amplificador operacional amb una tensió d'alimentació adequada a aquestes magnituds, una tasca complicada tenint en compte que també s'han de poder tractar senyals de l'ordre d'unitats de mV tot mantenint a ratlla l'*offset* i la deriva.

A la figura (6.15) s'exposa la funció  $fem(t)$  a camps baixos i mitjans. Es pot apreciar que la *fem* màxima és més gran quan la inversió es fa a densitats de flux de més magnitud.

La figura (6.16) mostra el mateix quan  $\Delta B$  és màxim. De seguida es pot veure la problemàtica que s'acaba de descriure.

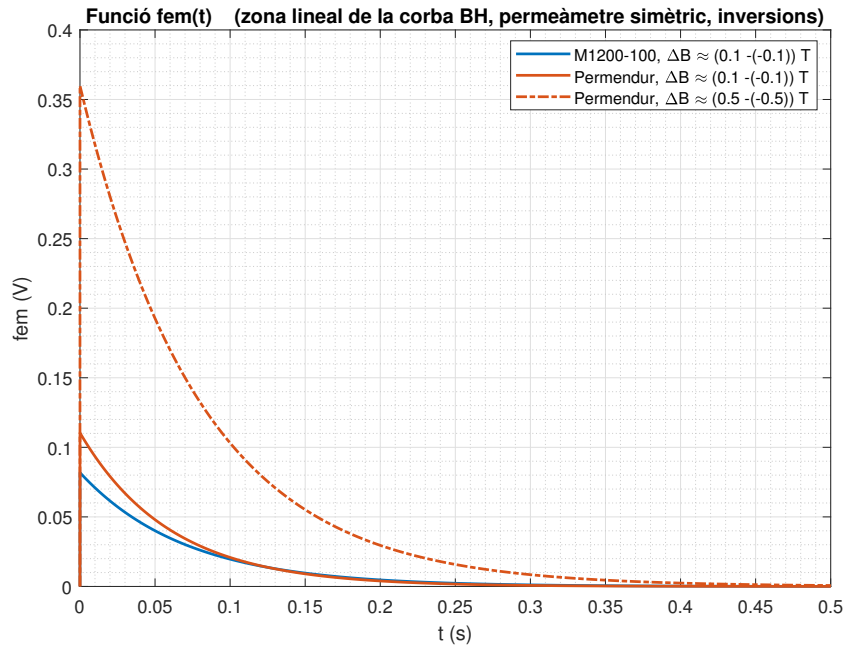


Figura 6.15: *Evolució de la fem en el temps per a camps baixos i mitjos (permeàmetre simètric, mètode de les inversions).*

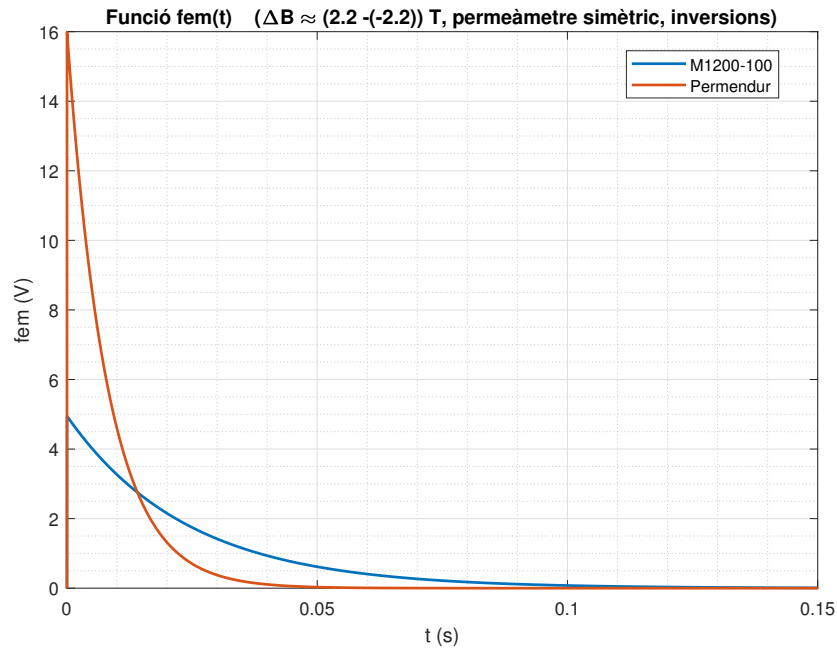


Figura 6.16: *Evolució de la fem en el temps per a camps alts (permeàmetre simètric, mètode de les inversions).*

## Espectre freqüencial

S'ha realitzat un anàlisi de l'espectre freqüencial dels casos límit explicats a l'apartat 5.4.4. A les següents figures es pot apreciar l'ample de banda d'ambdós senyals.

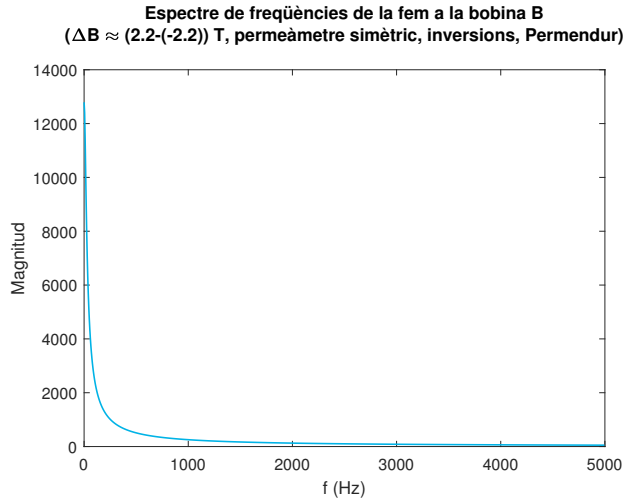


Figura 6.17: *Espectre freqüencial de la fem a la bobina B en un cas límit (mètode de les inversions). El material és permendur i la variació de densitat de flux és màxima (4.4 T). La constant de temps  $\tau = 0.008$  s és la mínima*

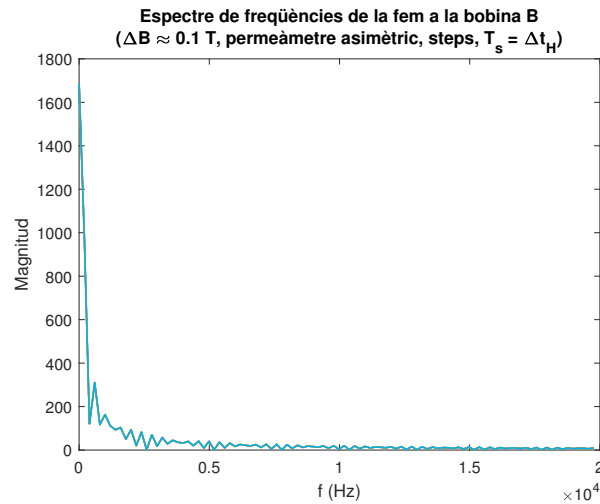


Figura 6.18: *Espectre freqüencial de la fem a la bobina B en un cas límit (mètode dels steps). Es tracta del cas límit en què B s'estabilitza tan ràpidament com canvia el corrent de magnetització.*

L'espectre s'ha retallat per la dreta per tal de mostrar només les primeres freqüències, que és on hi ha els pics. D'aquesta manera es poden apreciar millor els resultats.

Es conclou que clarament no existeix una limitació d'ample de banda.

## 6.4 Dimensionament de la bobina H

Tant per al permeàmetre simètric com per a l'asimètric s'ha escollit el mateix fil conductor. El nombre de voltes i la secció de la bobina també són iguals en ambdós models. Les característiques de les bobines H es mostren a continuació:

- Fil: #AWG *Metric 2.0*
- Secció del fil (sense aïllant):  $S_{fil} = 0.0314 \text{ mm}^2$
- Diàmetre del fil (amb aïllant):  $d_{fil+aïllant} = 0.225 \text{ mm}$
- Secció de la bobina:  $S_b = 42.719 \text{ mm}^2$
- Nombre de voltes:  $N_b = 1000$  voltes
- Nombre de capes:  $N_{cb} = 4$  capes
- Longitud total de la bobina:  $L_b = 50.625 \text{ mm}$
- Resistència per *km*:  $R_{km} = 212.872 \Omega \cdot \text{km}$
- Resistència total del fil de la bobina:  $R_{fil} = 8.048 \Omega$

Les bobines H aniran col·locades a l'exterior de la bobina B, a uns 5 mm d'aquesta i separades 2 mm entre elles.

### 6.4.1 Permeàmetre asimètric

Amb les característiques de la bobina H llistades anteriorment, s'ha comprovat que la *fem* té un valor mínim de l'ordre de desenes de  $\mu\text{V}$  i un valor màxim de l'ordre de desenes de mV. El rang aproximat és de 90  $\mu\text{V}$  a 11 mV, tot i que a la pràctica aquests valors poden variar lleugerament depenent dels salts de corrent amb què es realitzin les mesures.

### 6.4.2 Permeàmetre simètric

El rang aproximat de la *fem* amb el permeàmetre simètric és de 50  $\mu\text{V}$  a 13 mV amb el mètode de les inversions. Per al mètode dels *steps*, el límit superior del rang és molt similar al de l'apartat anterior, però el límit inferior és també de 50  $\mu\text{V}$ . El motiu és que



en camps molt baixos costa més magnetitzar la mostra amb el permeàmetre simètric, per la qual cosa cal més  $fmm$  i el temps de canvi del corrent és més gran.

### 6.4.3 Espectre freqüencial

La figura (6.19) mostra l'espectre freqüencial en el pitjor cas detectat, que coincideix amb la primera mesura amb el permeàmetre asimètric utilitzant el mètode dels steps. L'espectre freqüencial en aquest punt és molt similar per a tots els materials simulats. Aquí es mostra només el cas del M1200-100.

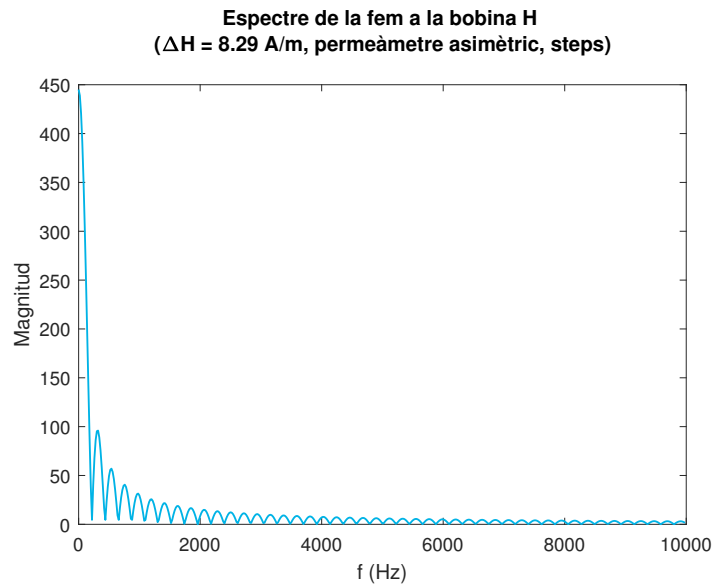


Figura 6.19: *Espectre freqüencial de la fem a la bobina H en el cas més limitant.*

Estudiant la imatge es pot veure fàcilment que l'ample de banda és prou estret perquè no suposi una limitació de disseny.

## 6.5 Disseny del circuit secundari

### 6.5.1 Senyal de la bobina B

Gràcies als bons resultats obtinguts tant a camps baixos com a camps alts, es presenta un sol disseny per a ambdós permeàmetres (asimètric i simètric) que funciona tant amb el mètode de les inversions com amb el dels *steps*. L'amplificador operacional escollit és el model OPA189 de Texas Instruments. L'alimentació del dispositiu és dual, amb un rang de  $\pm 18$  V (màxim) a  $\pm 2.25$  V (mínim). Amb l'alimentació a  $\pm 18$  V, el senyal d'entrada

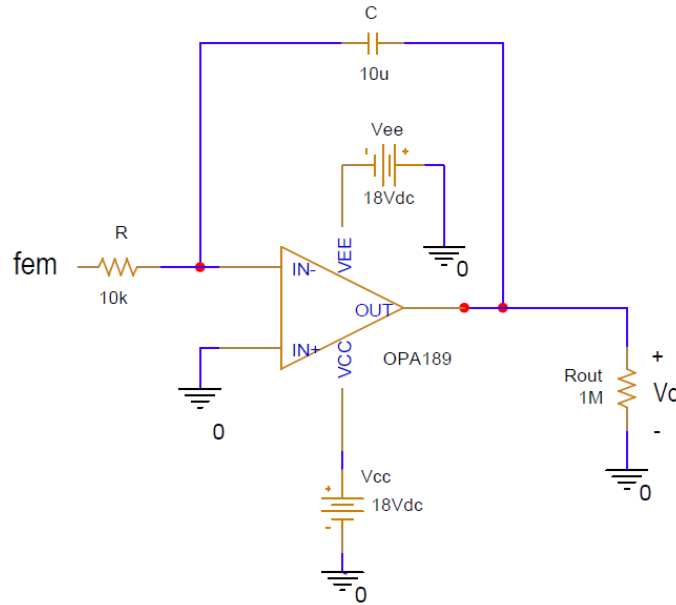


Figura 6.20: Esquema electrònic de l'integrador del senyal de la bobina  
B. La tensió de sortida es mesura a la resistència  $R_{out}$ .

pot arribar a una magnitud màxima de  $\pm 17.5$ , i per tant és ideal per a aquesta aplicació. Presenta un producte guany-amplada de banda de 14 MHz, un *offset* de  $\pm 3 \mu\text{V}$  i una deriva de  $\pm 0.005 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Aquest model s'ha seleccionat d'entre dos més, de característiques similars: l'OPA187 i l'OPA2182. Per mitjà de simulacions s'ha vist que l'OPA189 és el que respon millor.

Per tal d'aconseguir un guany igual a 10, la resistència  $R$  s'ha fixat a  $10 \text{ k}\Omega$  i la capacitància  $C$  a  $10 \mu\text{F}$ . La resistència de sortida  $R_o$  és d' $1 \text{ M}\Omega$ . La raó d'utilitzar una resistència tan gran és que s'ha observat que d'aquesta manera es redueix a zero l'*offset* al senyal de sortida, i el nivell mínim de la tensió  $V_o$  és sempre de  $17.955 \text{ V}$ , el valor típic que marca el full d'especificacions. En canvi, amb resistències més petites apareix un *offset* en contínua que no és constant per a tot el rang de mesura de la corba BH. El circuit es presenta a la figura (6.20).

A la figura (6.21) es mostra una comparació entre la  $fem$  i el senyal integrat resultant. Els errors relatius del resultat de la simulació versus el teòric són els següents:

- Per a la variació mínima de  $B$ : error=0.15%. La tensió de sortida és de  $149.19 \text{ mV}$ .
- Per a la variació màxima de  $B$ : error=0.15%. La tensió de sortida és d' $1.277 \text{ V}$ .

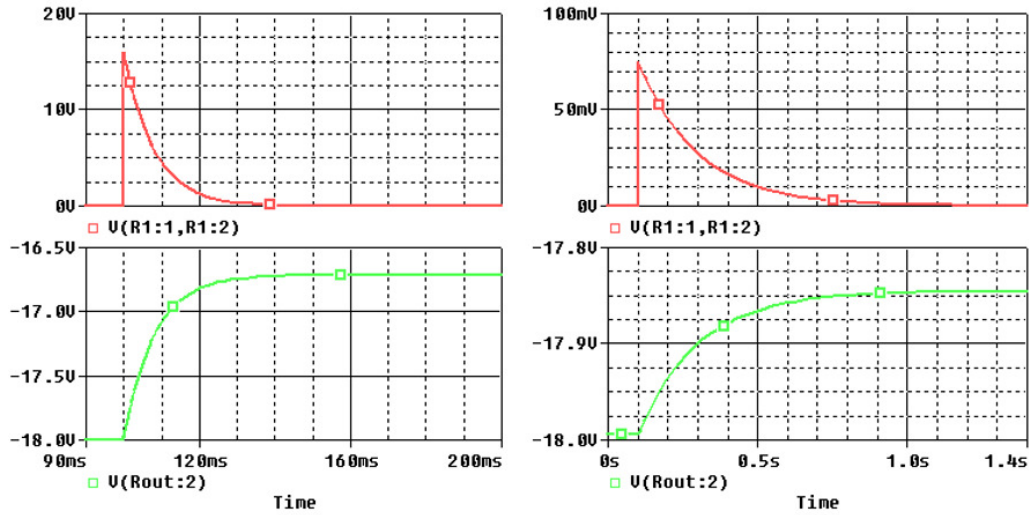
Senyal de la bobina B.  $fem$  (superior) i  $V_o$  (inferior).

Figura 6.21: Comparació de la  $fem$  i  $V_o$  per als casos límit de la bobina B. A l'esquerra es mostren els dos senyals quan  $\Delta B$  és màxima, i a la dreta quan  $\Delta B$  és mínima.

## 6.5.2 Senyal de la bobina H

El circuit dissenyat està format per dues etapes, la primera d'integració i la segona d'amplificació. El primer operacional és el model OPA388 de Texas Instruments, amb un voltatge d'*offset* de  $\pm 0.25 \mu\text{V}$ , una deriva de  $\pm 0.005 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  i un producte guany-ample de banda de 10 MHz. L'alimentació en dual és de  $\pm 1.25 \text{ V}$  a  $\pm 2.75 \text{ V}$ . A la segona etapa hi ha l'amplificador OPA189, les característiques del qual s'han llistat anteriorment.

El motiu d'utilitzar dues etapes disposades tal i com s'acaba de descriure és que, tot i que l'OPA388 realitza una millor integració del senyal que la resta d'amplificadors estudiats (OPA189, OPA187 i OPA2182), quan la variació d' $H$  és màxima amb un guany total  $G > 900$  el voltatge de sortida satura el dispositiu. La segona etapa acaba d'amplificar el senyal. D'aquesta manera s'aconsegueix que el voltatge de sortida sigui de l'ordre de mV quan la  $fem$  i el temps de variació són mínims.

Les dues etapes del circuit secundari es mostren a la figura (6.22). El guany de la primera etapa  $G_1$  és igual a  $1/(R \cdot C)$ . La resistència  $R$  s'escull per mitjà d'un interruptor selector de 3 posicions d'entre 3 resistors diferents: d'1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  i 100 k $\Omega$ . El condensador  $C$  té una capacitància de 100 nF. S'ha col·locat una resistència connectada a l'entrada no inversora de l'integrador de 10 k $\Omega$  per corregir l'*offset* del senyal de sortida, que sense aquest component és força significatiu. L'alimentació de l'amplificador és dual, de  $\pm 2.75$

V. La segona etapa, constituïda per l'amplificador OPA189 alimentat a  $\pm 18$  V, té un guany  $G_2$  de 39.

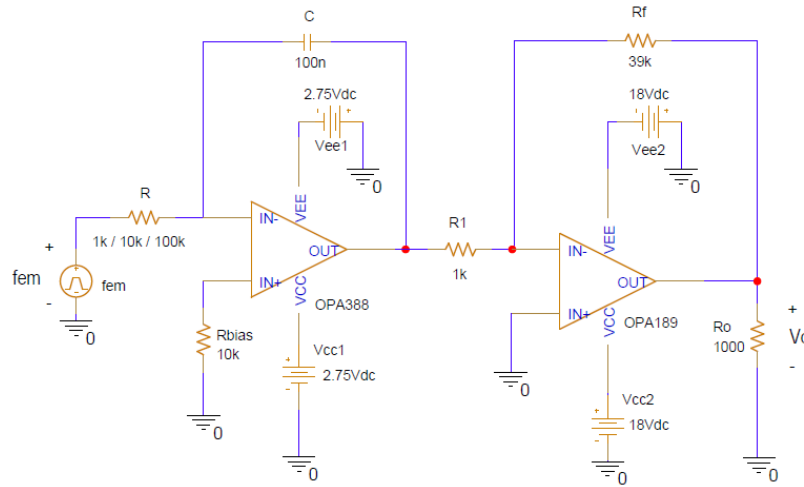


Figura 6.22: Esquema electrònic de l'integrador del senyal de la bobina  $H$ . La resistència  $R$  pot prendre valors d'entre  $1\text{ k}\Omega$ ,  $10\text{ k}\Omega$  i  $100\text{ k}\Omega$ , segons la zona de la corba  $BH$  que s'estigui caracteritzant. La tensió de sortida  $V_o$  es mesura a la resistència  $R_o$ .

Als primers punts de la zona lineal de la corba de magnetització i als voltants d' $H_C$  (el camp coercitiu) s'ha de connectar al circuit la resistència d' $1\text{ k}\Omega$ , ja que en aquesta regió  $\frac{\Delta H}{\Delta t}$  és mínim i pràcticament constant. Quan la magnitud dels canvis de corrent comenci a augmentar s'ha de canviar la connexió a la resistència de  $10\text{ k}\Omega$  per tal de no saturar els operacionals. Amb el mètode dels *steps*, tot i que la  $fem$  sigui molt similar que amb les inversions, els temps de canvi de corrent (i en conseqüència les magnituds de  $V_o$ ) són molt més petites. Això vol dir que amb el permeàmetre asimètric el més probable és que no calgui fer el canvi a la resistència de  $100\text{ k}\Omega$ . Amb el mètode de les inversions el seu ús és imprescindible si es treballa amb materials ferromagnètics com el M1200-100. Amb d'altres que es magnetitzin molt més fàcilment pot no ser necessària. Tot i així, per precaució s'inclou en tots els casos.

A través de simulacions amb el PSpice s'estudia l'error relatiu entre  $V_o$  a la sortida de la segona etapa del circuit amb els amplificadors reals i la seva magnitud teòrica, és a dir,  $V_o$  si els operacionals fossin ideals. S'analitzen només els casos als extrems del rang: quan el senyal de sortida és mínim i  $G = 390000$ , i quan el senyal de sortida és màxim i  $G = 3900$ . Una observació que s'ha fet durant les simulacions és que l'error es produeix en la primera etapa del circuit, en integrar el senyal. A la segona etapa és negligible en tots els casos.

**R=1 k $\Omega$** 

Quan la resistència és d'1 k $\Omega$  el guany total  $G$  és de 390000. Com que l'ample de banda ha demostrat no ser una limitació, aquest guany és assumible.

En aquest cas, el senyal mínim és de 202.08 mV. En termes de variació d' $H$ , això es tradueix en un error relatiu d'un 0.12%:  $\Delta H_{teòrica} = 9.64$  A/m amb un integrador ideal i  $\Delta H_{real} = 9.65$  A/m amb l'integrador real. Es considera negligible.

Amb aquest guany, l'error és significatiu quan s'integren  $fem$  elevades. S'ha volgut analitzar quin seria l'error d'integrar el senyal màxim (el pitjor cas; un que, de totes maneres, no tindrà mai lloc perquè sempre s'haurà reduït abans el guany). Per això s'ha de retirar la segona etapa d'amplificació, que no afegeix error però provocaria la saturació de l'operacional. S'ha trobat que en aquestes circumstàncies l'error relatiu és d'un 4.8%. S'insisteix que en realitat sempre serà molt més petit que el que s'acaba de calcular, i per tant no hi ha perill en aquest aspecte.

**R=100 k $\Omega$** 

Amb una resistència  $R$  de 100 k $\Omega$  s'aconsegueix un guany total  $G$  de 3900.

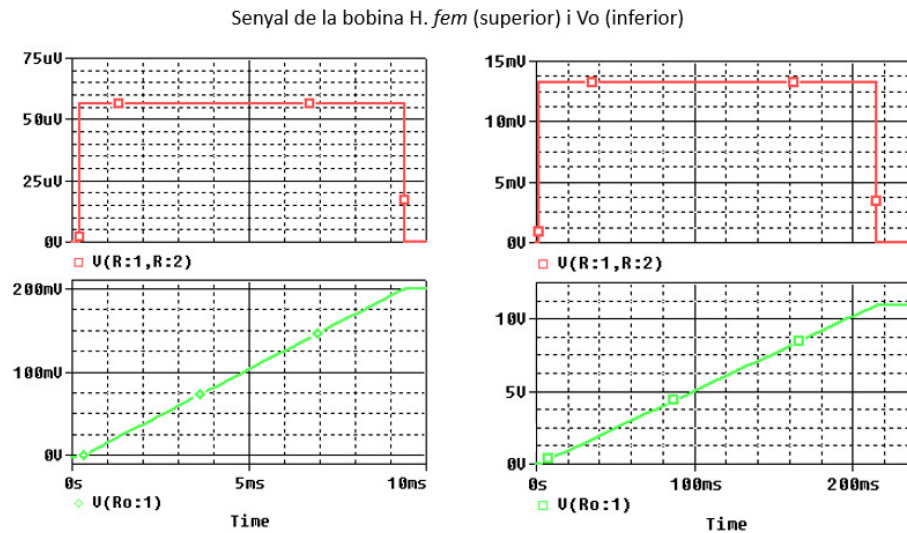


Figura 6.23: Visualització dels senyals  $fem$  i  $V_o$  (mínims i màxims) a la bobina H. A l'esquerra, ambdós senyals quan  $\Delta H$  és mínim, amb  $G = 390000$ . A la dreta, ambdós senyals quan  $\Delta H$  és màxim, amb  $G = 3900$ .

Malgrat que el següent cas no es donarà mai, quan  $V_o$  és mínim l'error relatiu és d'un

5.63% i la magnitud del senyal no supera les unitats de mV.

En canvi, la tensió màxima a la sortida de l'amplificador té una magnitud de 10.972 V i l'error relatiu és del 0.011% ( $\Delta H_{ideal} = 52400$  A/m i  $\Delta H_{real} = 52407$  A/m). S'observa que amb  $G = 3900$  l'error és més gran a voltatges més baixos. Tot i així, es torna a fer incís en el fet que l'error sempre serà molt més petit que el màxim calculat perquè mai es faran mesures a camps baixos amb aquest guany al circuit.

A la figura (6.23) es mostra una comparació de la  $fem$  a l'entrada del circuit secundari i  $V_o$  a la seva sortida per a les dues resistències de 1 k $\Omega$  i 100 k $\Omega$  i  $V_o$  mínim i  $V_o$  màxim, respectivament.

# Capítol 7

## Planificació

### 7.1 Planificació inicial

La planificació del projecte consta de diverses tasques marcades, cada una pertanyent a una de quatre categories diferents (de recerca, de definició de la solució, de disseny i de redacció). La data inicial és el 12 de febrer, el dia de l'entrega de l'avantprojecte, i la data final és el 18 de juny, dia en què es lliura la memòria de detall. Per a dissenyar la planificació proposada s'ha fet servir l'eina MS Project, facilitada per la universitat. En aquesta secció es pot consultar la durada de cada tasca en dies, així com les hores de feina que representarà cada una i el diagrama de Gantt de la planificació. Es recorda que només existeix un recurs, que és la projectista.

Es contemplen tant aquelles activitats que representen el nucli del projecte com les de redacció i recerca. Es considera que el volum escrit d'un treball com aquest és prou important per tenir-ne en compte la redacció fins i tot durant les etapes intermèdies. Això ho justifica la dificultat i l'extensió d'alguns conceptes necessaris per poder contextualitzar, explicar i comprendre el projecte. Per tant les hores de redacció representen un percentatge molt important del total i aquesta importància s'ha de veure reflectida en el treball final.

La planificació es descompon en les següents dates assenyalades/tasques principals:

1. Entrega de l'avantprojecte.
2. Revisió dels conceptes teòrics aplicables. Consisteix a comprovar la feina de l'avantprojecte i a acabar d'establir les bases teòriques per començar a fer simulacions.

Codi	Descripció
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa
1.2	Hores de projectista destinades a la definició i plantejament de la solució
1.3	Hores de projectista destinades al desenvolupament i disseny de la solució (H/S)
1.4	Hores de projectista destinades a la realització i posada en marxa del prototip
1.5	Hores de projectista destinades a l'elaboració escrita i edició dels documents del projecte

Taula 7.1: Tipus de tasques.

3. Anàlisi magnetostàtic. Consisteix a realitzar totes les activitats relacionades amb el disseny del circuit magnètic del permeàmetre i el dimensionament de les bobines de magnetització. Es tracta d'una tasca iterativa dividida en més subtasques. És un dels punts més conflictius del projecte en relació a la planificació, ja que sense saber el nombre total de cops que s'haurà de repetir la tasca el temps dedicat pot acabar esdevenint força més gran o petit que l'estimat.
4. Anàlisi dinàmic. És el conjunt de subtasques que consisteixen a comprovar la resposta dinàmica del model de permeàmetre dissenyat durant l'anàlisi magnetostàtic. Han de servir per dimensionar la bobina B i el dispositiu de mesura d' $H$ , que és la següent tasca.
5. Dimensionament de les bobines secundàries. Dividit en dues subtasques: la bobina B i el dispositiu de mesura d' $H$ .
6. Entrega de la memòria intermèdia.
7. Disseny del circuit elèctric i electrònic. És el conjunt de subtasques destinades a dissenyar la instrumentació connectada a les bobines B i H al secundari i dimensionar les bobines del primari.
8. Concreció del disseny final del permeàmetre. Consisteix a definir concretar tots els paràmetres del circuit magnètic i dels circuits primari i secundari.
9. Estudi econòmic i elaboració del pressupost.
10. Redacció de la guia d'usuari del permeàmetre.
11. Tancament del projecte.
12. Redacció de la memòria.



13. Correcció de la memòria.
14. Entrega de la memòria final.

Els tipus de tasques es poden consultar a la taula (7.1).

Planificació inicial				
Núm.	Tasca	Dies	Hores	Predecessores
1	1. Entrega avantprojecte	0	0	
2	2. Revisió dels conceptes teòrics aplicables	5	6	1
3	3. Anàlisi magnetostàtic (OPERA 3D)	28	106	1
4	3.2. Disseny del permeàmetre (activitat iterativa)	25	100	
5	3.2.1. Modelització	20	45	2
6	3.2.2. Disseny de les bobines de magnetització	20	45	2
7	3.2.2. Anàlisi de resultats	5	10	5;6
8	3.3. Comparació i selecció entre diferents dissenys	3	6	7
9	4. Anàlisi dinàmic (Ansys/OPERA 2D)	13	39	
10	4.1. Estudi de l'efecte dels corrents de Foucault	10	18	8
11	4.2. Estudi del comportament dinàmic de B i H	10	18	8
12	4.3. Anàlisi de resultats	3	3	10;11
13	5. Redacció de la memòria	40	40	7
14	6. Dimensionament de les bobines secundàries	10	30	
15	6.1. Dimensionament de la bobina B	10	15	12
16	6.2. Dimensionament del dispositiu de mesura d'H	10	15	12
17	Entrega de la memòria intermèdia	0	0	0
18	7. Disseny del circuit elèctric i electrònic	21	55	
19	7.1. Revisió de les possibles alternatives	1	2	15;16
20	7.2. Disseny del circuit secundari	12	30	
21	7.2.1. Mesura del senyal de B	12	15	19
22	7.2.2. Mesura del senyal d'H	12	15	19
23	7.3. Disseny del circuit primari	6	8	19
24	7.4. Mètode de tractament de les dades	8	15	21;22
25	8. Concreció del disseny final del permeàmetre	2	8	24
26	8. Estudi econòmic i elaboració del pressupost	3	9	25
27	9. Redacció de la guia d'usuari del permeàmetre	5	10	25
28	10. Tancament del projecte	5	10	26;27
29	11. Redacció de la memòria	15	35	25
30	12. Correcció de la memòria	2	8	28;29
31	12. Entrega de la memòria de detall	0	0	30
<b>TOTAL</b>		<b>89</b>	<b>356</b>	

Taula 7.2: Numeració de les tasques de la planificació inicial, duració en dies i hores totals de cada una.

A la planificació s'han comptat tots els dies laborals amb una jornada de 4 hores diàries, és a dir, de 20 hores setmanals. Els dies festius (exceptuant caps de setmana) també s'han comptat com a laborables. El total d'hores invertides en el projecte ha de ser de 400. En aquest recompte no s'inclouen aquelles que pertanyin a la feina feta a ALBA. A la taula

(7.2) es mostra cada tasca, els dies a què equival i les hores dedicades totals.

La situació ideal es donaria si totes les tasques s'acabessin a la seva data de finalització corresponent (o fins i tot abans), però és possible que alguna activitat es retardi o s'avanci. De totes maneres, el fet de disposar dels caps de setmana lliures permet avançar feina fora d'hores per tal de disminuir l'impacte dels retards que puguin donar-se durant l'execució del projecte.

Les 44 hores restants es reparteixen de la següent manera:

- 14 hores extres a tasques de recerca.
- 10 hores extres a tasques de definició de la simulació.
- 10 hores extres a tasques de disseny.
- 10 hores extres a tasques de redacció.

Cada divendres, quan s'avalua la feina que s'ha fet la durant la setmana, s'adjudica la quantitat d'hores extres que cal dedicar a un tipus de tasca la semana següent. La suma de totes elles ha de ser 44.

El diagrama de Gantt de la planificació es mostra a la figura (7.1).

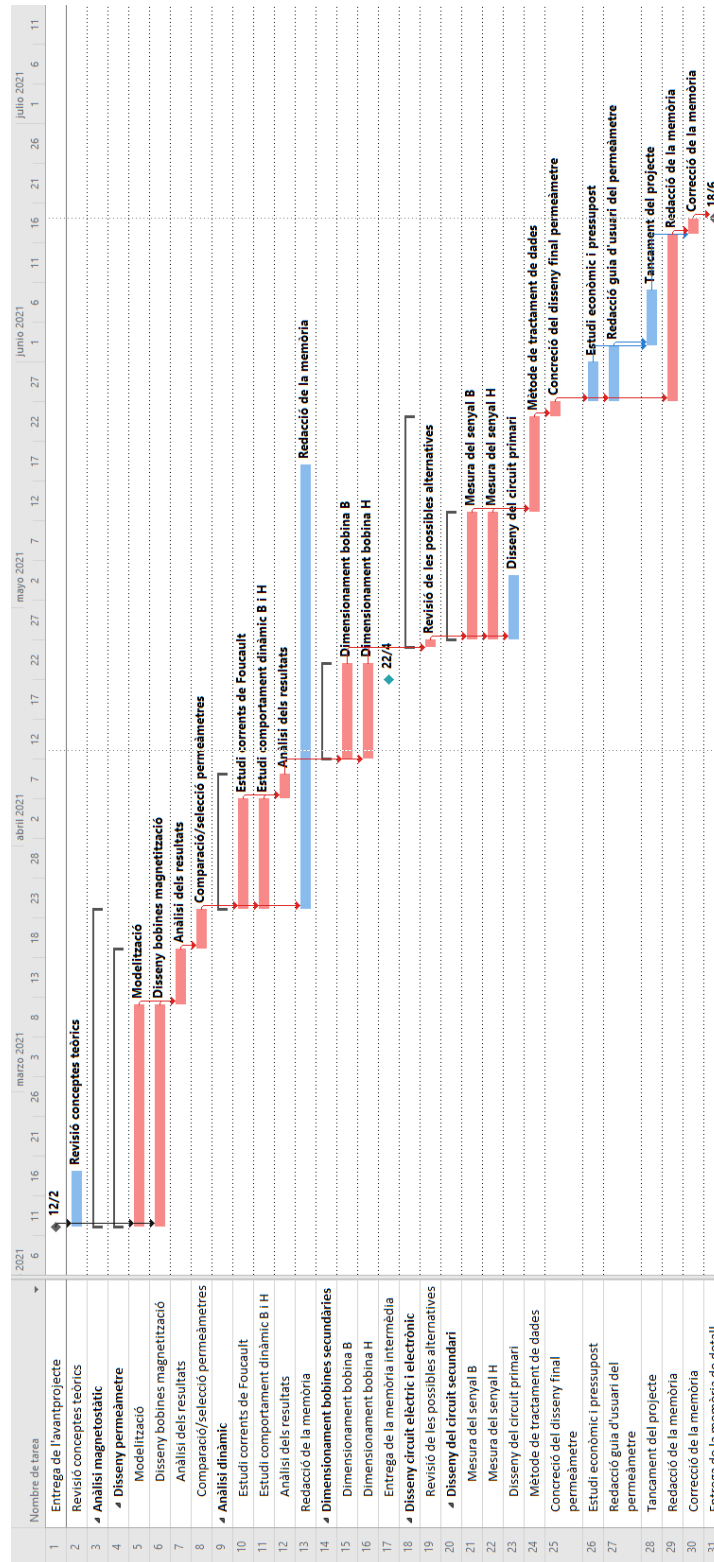


Figura 7.1: Diagrama de Gantt de la planificació inicial. El camí crític es mostra en vermell.

## 7.2 Execució

En aquest apartat es mostra quina ha estat l'execució real del projecte. La taula (7.3) mostra les dies i les hores dedicades a cada tasca. A la figura (7.2) es pot veure el diagrama de Gantt amb el seu camí crític real.

Execució del projecte				
Núm.	Tasca	Dies	Hores	Predecessores
1	1. Entrega avantprojecte	0	0	
2	2. Revisió dels conceptes teòrics aplicables	5	6	1
3	3. Anàlisi magnetostàtic (OPERA 3D)	32	137	1
4	3.2. Disseny del permeàmetre (activitat iterativa)	29	131	
5	3.2.1. Modelització	20	55	2
6	3.2.2. Disseny de les bobines de magnetització	24	66	2
7	3.2.2. Anàlisi de resultats	5	10	5;6
8	3.3. Comparació i selecció entre diferents dissenys	3	6	7
9	4. Anàlisi dinàmic (Ansys/OPERA 2D)	18	46	
10	4.1. Estudi de l'efecte dels corrents de Foucault	15	20	8
11	4.2. Estudi del comportament dinàmic de B i H	15	20	8
12	4.3. Anàlisi de resultats	3	6	10;11
13	5. Redacció de la memòria	28	56	7
14	6. Dimensionament de les bobines secundàries	5	30	
15	6.1. Dimensionament de la bobina B	5	15	12
16	6.2. Dimensionament del dispositiu de mesura d'H	5	15	12
17	Entrega de la memòria intermèdia	0	0	
18	7. Disseny del circuit elèctric i electrònic	19	63	
19	7.1. Revisió de les possibles alternatives	1	5	15;16
20	7.2. Disseny del circuit secundari	10	40	
21	7.2.1. Mesura del senyal de B	10	20	19
22	7.2.2. Mesura del senyal d'H	10	20	19
23	7.3. Disseny del circuit primari	1	5	19
24	7.4. Mètode de tractament de les dades	8	16	21;22
25	8. Concreció del disseny final del permeàmetre	1	5	24
26	8. Estudi econòmic i elaboració del pressupost	2	10	25
27	9. Redacció de la guia d'usuari del permeàmetre	1	5	25
28	10. Tancament del projecte	2	10	26;27
29	11. Redacció de la memòria	24	60	16
30	12. Correcció de la memòria	5	25	28;29
31	12. Entrega de la memòria de detall	0	0	30
<b>TOTAL</b>		<b>89</b>	<b>453</b>	

Taula 7.3: Numeració de les tasques de l'execució del projecte, duració en dies i hores totals de cada una.

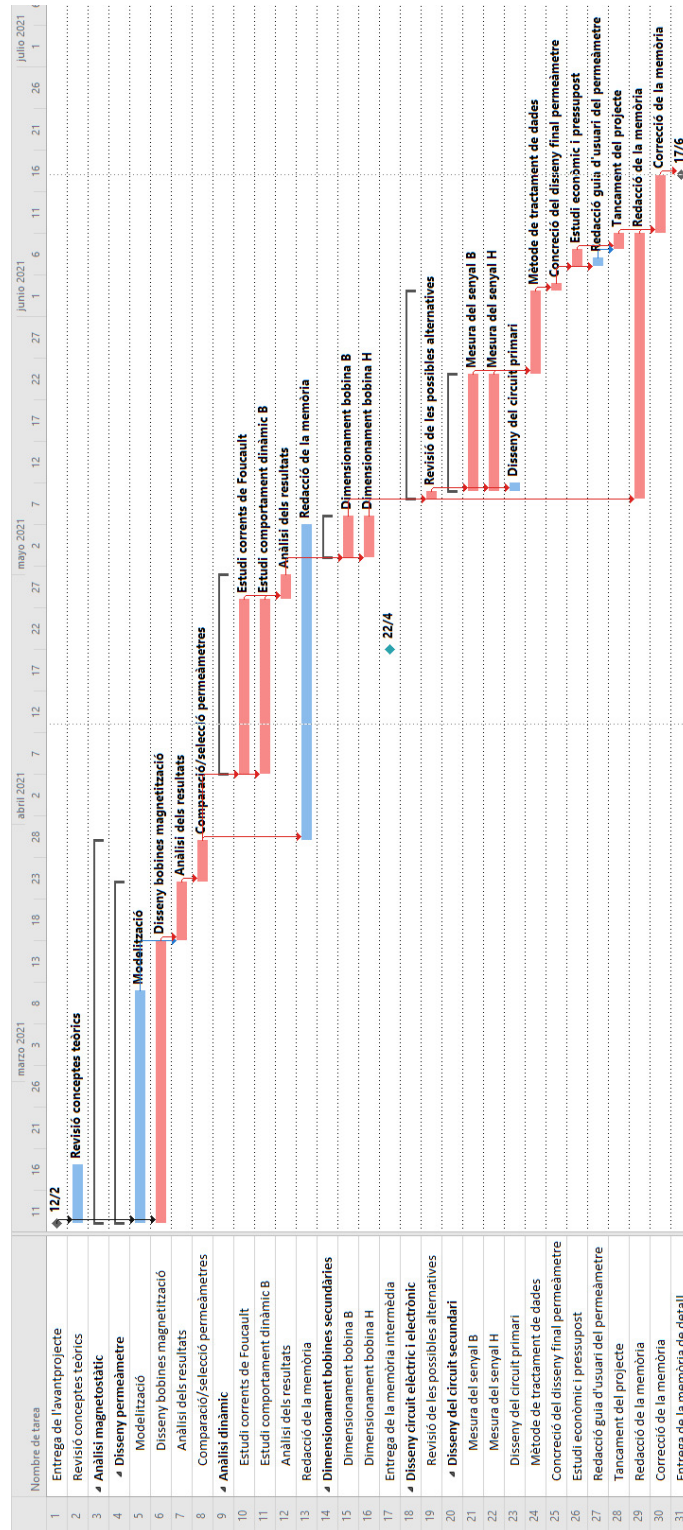


Figura 7.2: Diagrama de Gantt de l'execució del projecte. El camí crític es mostra en vermell.

## 7.3 Desviacions

Durant el projecte s'han experimentat un seguit de desviacions en la planificació que n'han retardat algunes tasques. Els motius d'aquestes modificacions el les hores totals de feina i les dates s'expliquen a continuació.

Primer de tot, han estat necessàries més hores de recerca d'informació del que s'esperava. Abans de l'inici del projecte es creia que ja es disposava de prou marc teòric per no haver de dedicar un volum d'hores massa gran a la recerca, però posteriorment es s'ha fet palesa la necessitat d'aprofundir en la teoria. Alguns dels conceptes tractats en aquest treball no són coneguts fora de la comunitat científica dedicada a estudiar el magnetisme en la matèria i les mesures magnètiques, cosa que ha complicat molt el procés de cerca i d'interpretació de la informació.

En segon lloc, les tasques a partir de l'anàlisi dinàmic (núm. 9) es van veure endarrerides perquè no es disposava de la llicència d'Ansys. Aquest temps es va dedicar a la redacció del treball, però el camí crític va experimentar un endarreriment considerable, per la qual cosa algunes de les tasques finals es van haver d'escurçar en dies i algunes fins i tot en hores. Finalment es va optar per prosseguir sense la llicència amb l'eina 2D d'Opera.

Codi	Descripció	Planificació	Execució
1.1	Hores de projectista destinades a la cerca d'antecedents i informació prèvia diversa	40	51
1.2	Hores de projectista destinades a la definició i plantejament de la solució	70	62
1.3	Hores de projectista destinades al desenvolupament i disseny de la solució (H/S)	187	194
1.4	Hores de projectista destinades a la realització i posada en marxa del prototip	0	0
1.5	Hores de projectista destinades a l'elaboració escrita i edició dels documents del projecte	103	146
Total		400	453

Taula 7.4: Hores totals de la planificació inicial i de l'execució.

S'observa que la quantitat total d'hores és força superior a les 400 que s'havien previst. Aquest augment és degut, en la major part, a l'augment d'hores dedicades a la redacció del treball, de 88 en la planificació original a 146 en l'execució del projecte. Això es veu reflectit sobretot en la llargada del document escrit, però no és l'únic motiu d'aquesta diferència tan gran. El fet d'utilitzar Latex com a editor de textos ha fet força més complex el procés de redacció i, sobretot, de donar format al treball.

A la taula (7.4) es poden veure les hores de cada tipus dedicades a en la planificació inicial i en l'execució del projecte i el total d'hores.





## Capítol 8

# Impacte mediambiental

Tot i que el factor ambiental juga un paper poc important en el projecte, el permeàmetre dissenyat té lligats un seguit d'impactes sobre el medi i l'entorn que es descriuen en aquest apartat.

A les taules (8.1) i (8.2) es mostren les accions impactants i els factors ambientals impactats, respectivament. A continuació es fa un anàlisi dels riscos ambientals del projecte.

### 8.0.1 Relacionats amb matèries primeres

Una part de l'impacte del projecte es deu a l'ús de materials fèrrics com a materials de fabricació del *yoke*. Es tenen en compte tant l'impacte derivat de la seva extracció com el del procés de producció, que depèn de variables com l'energia elèctrica que requereix i la seva procedència o la resta de materials que intervenen en el procés. En la fabricació de ferroaliatges, que s'utilitzen després per produir acers Fe-Si o Fe-Ni, alguns agents reductors (com el carbó de coc) es transformen en CO o en CO<sub>2</sub>, i altres fragments de material (com quartzita, usada en aliatges de ferro i silici) es veuen arrossegats per aquests gasos. Per altra banda, tenint també en compte la gran quantitat d'energia perduda en el procés de fabricació d'aquests aliatges, el seu impacte ambiental és gran.

La fabricació del nucli és un procés extern a ALBA que depèn exclusivament dels seus proveïdors, per la qual cosa no es té control sobre les accions preses per reduir l'impacte durant aquesta fase. No obstant això, cal tenir en compte que es construirà una sola unitat de producte amb finalitats experimentals, i per tant el seu impacte relatiu és força baix.

### 8.0.2 Relacionats amb la vida útil i la generació de residus

S'espera que la vida útil del permeàmetre sigui prou llarga perquè no calgui emprendre accions de reducció de l'impacte residual del seu nucli a curt termini. En cas que deixi de ser operatiu es prendran les mesures adients per al seu reciclatge.

Els elements del permeàmetre amb més risc de deteriorament són els següents:

- El fil del bobinat de magnetització. Encara que no se sobrepassi el corrent màxim que pot suportar el fil sense experimentar efectes detrimentals crítics deguts a la temperatura, durant les mesures la intensitat del primari és prou significativa perquè a llarg termini s'hagi de canviar la bobina per assegurar el correcte funcionament del permeàmetre.
- Dispositius electrònics del secundari (integradors).

En cas que algun d'aquests elements falli, es pot intercanviar fàcilment per un de nou.

El Reial Decret 110/2021, de 20 de febrer, regula la gestió dels residus d'aparells elèctrics i electrònics (RAEE) com les fonts d'alimentació i els amplificadors operacionals. En cas de fallada s'entregaran a l'entitat local o a l'empresa distribuïdora/productora corresponent per al seu tractament i reutilització.

### 8.0.3 Relacionats amb la despesa d'energia

En la despesa d'energia intervé la potència màxima consumida per ambdós permeàmetres dissenyats.

La potència màxima consumida per les bobines de magnetització és de 3.98 W (N1) i 84.24 W (N2) en el cas del permeàmetre simètric i d'1.98 W (N1) i 42.12 W (N2) en el cas de l'asimètric. En general, però, treballarà amb potències molt més baixes que les descrites. Les potències màximes dels amplificadors operacionals són negligibles.

Es considera que l'impacte degut a l'augment de temperatura causat per la circulació del corrent per les bobines de magnetització (d'uns 26 °C per a la bobina N2 amb els dos permeàmetres) no afectarà la presa de mesures.

### 8.0.4 Relacionats amb la salut

El dispositiu dissenyat genera camps electromagnètics variables.

El seu ús es limita a realització de mesures a dins del laboratori de mesures magnètiques d'ALBA, que es troba sota la normativa relacionada amb la protecció de la salut i la seguretat dels treballadors contra riscos relacionats amb l'exposició a camps electromagnètics (Reial Decret 299/2016, de 22 de juliol). En aquest laboratori no és permesa l'entrada de treballadors que duguin marcapassos.

No s'aplicaran camps magnètics de magnitud gaire gran ni freqüències gaire altes que puguin causar efectes directes sobre els individus per camps electromagnètics, i per tant el perill és mínim i es limita a aquells efectes indirectes sobre dispositius mèdics electrònics, com els mencionats marcapassos o desfibril·ladors, que pugui dur implantats l'usuari i les persones que s'hi trobin al voltant.

Per altra banda, les condicions de funcionament del permeàmetre requereixen l'aplicació de tensions en contínua de fins a 33 V amb el permeàmetre simètric, i a 16 V amb l'asimètric. El corrent en ambdós casos és de 2.3 A. Són magnituds prou grans perquè existeixi perill a l'hora de manipular el dispositiu.

La classificació del dispositiu dissenyat a dins de la normativa, en tant que prototip d'aplicació científica, és difícil de determinar. Per tal de protegir-ne l'integritat i l'entorn del perill elèctric la construcció i posada en marxa del permeàmetre, a més de procurar l'aïllament entre els seus elements (com s'ha comentat a l'apartat 5.2.9), s'hauran de complir les condicions necessàries perquè no es tingui accés a les parts perilloses del circuit. Per tant, el grau de protecció haurà de ser IP2X.

	Accions impactants	Observacions
Fase de construcció	Emissió de gasos i de pols a l'atmosfera	La fase de construcció és externa a ALBA en quasi tota la seva totalitat, exceptuant el procés d'assemblatge dels elements. Les accions impactants en aquesta fase corresponen a la fabricació del nucli del permeàmetre a càrrec del proveïdor.
	Generació de residus sòlids	
	Generació de líquids residuals tòxics	
	Moviment de terres i excavacions (mineria)	
	Contaminació acústica	
Fase d'operació i ús	Perill elèctric	Els residus no es produeixen durant la fase d'operació i ús, sinó en finalitzar la seva vida útil.
	Emissió de camps electromagnètics variables	
	Generació de residus sòlids	

Taula 8.1: Taula d'accions impactants.

	Factors ambientals	Impacte sobre..
Medi natural	Atmosfera	Qualitat de l'aire per abocament de residus en l'extracció de matèria primera i en la fabricació (poc important)
	Sòl	Estabilitat i moviment del terreny i contaminació per residus durant l'extracció de matèria primera i la fabricació (poc important)
	Aigua	Aigües subterrànies i superficials per abocament de residus líquids en la fabricació (poc important)
	Flora	Estabilitat de l'ecosistema vegetal en l'extracció de matèria primera i la fabricació (poc important)
	Fauna	Estabilitat de l'ecosistema animal en l'extracció de matèria primera (poc important)
	Medi perceptual	Les vistes i el paisatge en l'extracció de matèria primera (poc important)
Medi socioeconòmic	Usos del territori	El projecte no provoca cap alteració dels usos del territori
	Culturals	El projecte no causa conflictes culturals significatius
	Infraestructura	El projecte no causa alteracions en les infraestructures existents
	Humans	Salut i seguretat
	Economia i població	El projecte no produeix cap impacte significatiu en l'economia a nivell empresarial, ni tampoc genera ni elimina llocs de treball

Taula 8.2: *Taula de factors ambientals impactats.*

## Capítol 9

### Conclusions

El present projecte finalitza amb l'aportació de dos dissenys de permeàmetre, un simètric i l'altre asimètric, amb rangs de mesura pràcticament idèntics i trets diferencials relatius que impossibiliten l'elecció d'un per sobre de l'altre sense entrar en qüestions pràctiques que són potestat d'ALBA. Posat que s'ha demostrat teòricament la viabilitat d'ambdós models (sota condicions de disseny i d'ús diferents), l'elecció de quin es construirà finalment es deixa a mans del personal del laboratori de mesures magnètiques del sincrotró.

Al llarg del treball i mitjançant una sèrie d'anàlisis s'ha anat definint per parts el permeàmetre. A partir d'un anàlisi teòric exhaustiu s'han identificat els aspectes clau del disseny i s'ha descartat un conjunt important de variables. Entre d'altres coses, ha servit per escollir l'ús del mètode balístic com a algorisme de la variació del corrent de magnetització, una decisió que ha determinat la metodologia seguida a partir de l'estudi dinàmic.

En el cas d'aquest projecte, el marc teòric consisteix en el pilar fonamental sobre el qual es recolza la resta del contingut del treball. Això es deu sobretot a la naturalesa altament complexa del magnetisme en la matèria, traduïda en la presència de moltes dificultats i incerteses en la quantificació teòrica dels fenòmens que hi van lligats.

L'anàlisi magnetoestàtic ha permès dimensionar satisfactòriament el circuit magnètic i el bobinat de magnetització, evidenciant la necessitat de fer servir dues bobines del primari diferents, l'una per a intensitats de camp petites i l'altra per intensitats de camp mitjanes i grans, per tal d'abastir tot el rang de mesura desitjat amb el tipus de materials que es volen caracteritzar.

La solució és ideal per a aquest propòsit, però planteja altres complicacions en el disseny

relacionades sobretot amb les variacions de corrent al circuit primari i amb la resposta obtinguda en el circuit secundari. Per tal de contrarrestar aquestes dificultats al llarg de tot el treball s'han examinat els casos més desfavorables.

Per altra banda, dels resultats de l'anàlisi magnetoestàtic s'ha deduït que no és possible calcular  $H$  a partir del corrent de magnetització, forçant així l'utilització de dues bobines planes per registrar la variació de la intensitat de camp a la mostra.

A partir d'un estudi dinàmic enfocat a l'anàlisi qualitatiu (i quantitatiu, però de forma aproximada) dels corrents de Foucault i del temps d'estabilització de la densitat de flux magnètic s'ha arribat a la conclusió que la variant de les inversions del mètode balístic sols es pot fer servir en el permeàmetre simètric. Operant amb el permeàmetre asimètric es pot utilitzar la variant dels *steps*.

Partint dels resultats d'aquest anàlisi s'ha deduït la forma i la magnitud de la *fem* a la bobina B i a les bobines H. Posteriorment s'han dimensionat els integradors analògics per tal d'obtenir les magnituds de  $B$  i d' $H$  a la mostra.

S'ha vist que el circuit secundari de la bobina H, format per una primera etapa d'integració i una segona d'amplificació, ha de tenir un guany variable per tal de poder abastir el rang desitjat sense perdre resolució en els resultats, cosa que s'ha solucionat amb un interruptor selector connectat a tres resistències diferents.

## 9.1 Desviacions en el projecte

En un principi estava previst utilitzar l'eina d'anàlisi dinàmic d'Opera 3D per realitzar l'estudi dels corrents de Foucault, però ALBA no comptava amb la llicència. Es va considerar una opció alternativa, el programari Ansys, que estava pendent d'adquisició. Malauradament, la tramitació de la compra es va allargar i es va haver de prescindir d'ambdós softwares.

Això va representar un obstacle important en el projecte perquè es va haver d'idear la manera de realitzar un anàlisi dinàmic amb les eines de què es disposava. Finalment i després de varies consideracions es va optar per seguir treballant amb Opera 2D, que permet obtenir la resposta transitòria a un canvi de camp magnètic.

A aquestes alçades el projecte anava amb retard i algunes tasques havien quedat endarrerides. Aquesta situació va provocar certes desviacions en la planificació inicial.

## 9.2 Futures línies de treball

El projecte s'ha desenvolupat en un àmbit estrictament teòric, amb les limitacions que això comporta. Es vol reiterar que el magnetisme té un comportament molt diferent en condicions ideals i en l'àmbit experimental, una qüestió que queda fora de l'abast del treball i que per tant no s'ha avaluat. En aquest sentit, es plantegen unes línies de treball futures relacionades sobretot amb la posada en marxa del projecte per facilitar la transició de la teoria de la pràctica.

Primer de tot, és recomanable corroborar els resultats de l'anàlisi dinàmic un cop es disposi de la llicència d'Ansys. L'exercici consistiria a modelitzar el circuit magnètic en 3D tal com el simulat a l'anàlisi magnetoestàtic, assegurant que siguin pràcticament idèntics. Caldria examinar els casos presentats al treball i comparar-ne tant els corrents de Foucault com el temps d'estabilització de  $B$  després d'un canvi del corrent de magnetització.

Els resultats no haurien de distar gaire dels obtinguts en aquest apartat (en tot cas, les conclusions seran les mateixes), però es creu important garantir que la  $fem$  induïda a la bobina B no es dispara a voltatges massa grans o massa petits per ser mesurats. El que passaria en aquest cas és que l'integrador no funcionaria correctament i s'haurien de redimensionar la bobina B i el seu circuit secundari, però el disseny del circuit magnètic no s'hauria de retocar.

Un cop efectuades les validacions i esmenes necessàries en el model s'haurà de construir el permeàmetre i verificar-ne el funcionament amb mostres de propietats conegudes. El més probable és que s'hagin de resoldre qüestions mecàniques per facilitar el bon contacte entre elements i, a causa de pèrdues de flux no previstes, podria caldre bobinar més voltes al primari. No és un problema perquè en el procés de disseny s'ha contemplat aquest aspecte i és possible bobinar més fil sempre i quan no se superi el límit de tensió que pot subministrar la font d'alimentació.

Totes aquestes tasques es desenvolupen en les àrees de coneixement de la física i de l'enginyeria electrònica i mecànica, per la qual cosa es considera que, si es disposa dels recursos necessaris, en un futur proper pot ser molt interessant elaborar el projecte de l'execució experimental del disseny teòric del permeàmetre facilitat en aquest treball.





## Bibliografia

- [1] C. W. Burrows. The determination of the magnetic induction in straight bars. *Journal of Research of the National Bureau of Standard*, 6(1):31–88, 1909.
- [2] K. Rohit. *Electronic Instrumentation and Measurement*. Vikas Publishing House.
- [3] F. Fiorillo i I.D. Mayergoyz. *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. Electromagnetism. Elsevier Science, 2005.
- [4] H. Semat i R. Katz. *Physics [by] Henry Semat [and] Robert Katz*. Rinehart, 1958.
- [5] Takao Nakata, N. Takahashi, Koji Fujiwara, M. Nakano, Y. Ogura i K. Matsubara. An improved method for determining the dc magnetization curve using a ring specimen. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 28:2456 – 2458, 10 1992.
- [6] B.D. Cullity i C.D. Graham. *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley, 2011.
- [7] H. Aspden. A method of measuring the magnetic permeability of rod specimens. *Journal of Scientific Instruments*, 29(11):371–374, Novembre 1952.
- [8] R. L. Sanford i E. G. Bennet. An apparatus for magnetic testing at magnetizing forces up to 5,000 oersteds. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 23:415–425, Setembre 1939.
- [9] R. L. Sanford. Performance of the fahy simplex permeameter. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 4:703–709, Novembre 1929.
- [10] R. L. Sanford i P. H. Winter. A permeameter for magnetic testing at magnetizing forces up to 300 oersteds. *Journal of Research of the National Bureau of Standard*, 45:17–21, Juliol 1950.
- [11] P. Kašpar, P. Ripka i J. Jan Vyhnánek. Dc compensated permeameter - the accuracy study. *Journal of Electrical Engineering*, 69(6):415–417, Desembre 2018.

- [12] R. L. Sanford i E. G. Bennet. Determination of magnetic hysteresis with the fahy simplex permeameter. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 15:517–522, Novembre 1935.
- [13] S. Sanfilippo. Hall probes: Physics and application to magnetometry. *CAS 2009 - CERN Accelerator School: Magnets, Proceedings*, 03 2011.
- [14] Slawomir Tumanski. Induction coil sensors—a review. *Measurement Science and Technology*, 18(3):R31–R46, jan 2007.
- [15] Ahmed Abou-Elyazied Abdallah i Luc Dupré. A rogowski–chattcock coil for local magnetic field measurements: sources of error. *Measurement Science and Technology*, 21(10):107003, sep 2010.
- [16] S. Tumanski. *Handbook of Magnetic Measurements*. Series in Sensors. CRC Press, 2016.
- [17] T. Nakata, Y. Kawase i M. Nakano. Improvement of measuring accuracy of magnetic field strength in single sheet testers by using two h coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, 23(5):2596–2598, 1987.
- [18] S. Tumanski. A multi-coil sensor for tangential magnetic field investigations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242-245:1153 – 1156, 2002. Proceedings of the Joint European Magnetic Symposia (JEMS'01).
- [19] G. Bertotti. *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Electromagnetism. Elsevier Science, 1998.
- [20] J.M.D. Coey. *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 2010.
- [21] Andries Daem, Peter Sergeant, Luc Dupr  ©, Somsubhro Chaudhuri, Vitaliy Bliznuk i Leo Kestens. Magnetic properties of silicon steel after plastic deformation. *Materials*, 13(19), 2020.
- [22] Ferenc Preisach. On the magnetic aftereffect. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(3):1–11, 2017.
- [23] A. De Blas. *Modelizaci  n de la hist  resis magn  tica y su aplicaci  n al c  lculo num  rico en m  quinas el  ctricas*. Tesi Doctoral, Universitat Polit  cnica de Catalunya, 2005.
- [24] Robert L. Boylestad. *Introductory circuit analysis*. Pearson, 13a edici  , 2015.