

# Resum

En aquest Projecte Fi de Carrera es desenvolupa el model dinàmic d'un cable superconductor per el transport i distribució d'energia elèctrica. De la necessitat de realitzar estudis dinàmics del comportament de la xarxa sorgeix la necessitat de modelar dinàmicament els elements que componen un sistema elèctric.

Per portar a terme aquest treball s'ha utilitzat el llenguatge de programació FORTRAN ja que és el que utilitza el programa PSS<sup>TM</sup>E. Amb aquest llenguatge es programa el model dinàmic que s'introdueix al PSS<sup>TM</sup>E mitjançant una llibreria dinàmica.

El comportament dels cables superconductors no difereix substancialment dels convencionals o d'una línia aèria. La diferència consisteix en que el valor de la resistència que ofereix el cable al pas del corrent varia segons la intensitat que circula per ell i de la temperatura del material superconductor. A més, les pèrdues del cable no segueixen el comportament clàssic (efecte Joule, llei de Ohm). L'objectiu d'aquest treball és, a partir de les equacions que regeixen el comportament dels materials superconductors, obtenir el modelat i poder observar el comportament dinàmic d'un sistema elèctric integrant cables superconductors.

Una vegada s'ha obtingut el model, s'ha integrat a una xarxa de proves i s'ha comprovat el comportament del model del cable superconductor. Finalment s'ha comparat el comportament del sistema elèctric instal·lant un cable superconductor i un convencional treballant en antena, simulant la configuració típica de la xarxa de distribució.





# Índex

<b>Resum</b>	<b>1</b>
<b>Glossari</b>	<b>9</b>
<b>Prefaci</b>	<b>13</b>
<b>Introducció</b>	<b>15</b>
<b>1 La superconductivitat</b>	<b>17</b>
1.1 La superconductivitat . . . . .	17
1.2 Classificació de superconductors . . . . .	17
1.3 Tipologies de cable . . . . .	22
<b>2 Modelat del cable superconductor</b>	<b>27</b>
2.1 Inductància . . . . .	28
2.2 Capacitància . . . . .	28
2.3 Resistència . . . . .	29
2.4 Esquema equivalents del cable . . . . .	30
<b>3 Anàlisi de sistemes elèctrics en PSS<sup>TM</sup>E</b>	<b>33</b>
3.1 Anàlisi en règim permanent . . . . .	33
3.2 Anàlisi i model dinàmic . . . . .	35
3.2.1 Modelat dels elements de la xarxa de proves . . . . .	35
3.2.2 Estructura de la simulació dinàmica . . . . .	36
3.2.3 Escriptura del model d'usuari . . . . .	36
<b>4 Simulacions</b>	<b>39</b>
4.1 Comportament del cable superconductor . . . . .	39
4.2 Comparació del comportament del sistema elèctric . . . . .	44
4.2.1 Cable convencional . . . . .	44
4.2.2 Anàlisi . . . . .	44



<b>Conclusions</b>	<b>47</b>
<b>Agraïments</b>	<b>49</b>
<b>A Resolució de fluxos de càrregues</b>	<b>51</b>
A.1 Introducció . . . . .	51
A.2 Formulació del problema . . . . .	51
A.3 Mètode de Newton-Raphson . . . . .	53
<b>B Paràmetres geomètrics del cable</b>	<b>55</b>
<b>C Sistema Per Unitat</b>	<b>57</b>
<b>D Pressupost</b>	<b>59</b>
D.1 Introducció . . . . .	59
D.2 Pressupost del hardware . . . . .	59
D.3 Pressupost del software . . . . .	59
D.4 Pressupost de mà d'obra . . . . .	60
D.5 Pressupost total . . . . .	60
<b>E Impacte ambiental</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>64</b>



# Índex de figures

1	Sistemes elèctrics equivalents. AMSC [1]. . . . .	14
1.1	Resistivitat de superconductors tipus I (a) i tipus II (b). . . . .	19
1.2	Diferència magnetisme entre tipus I i tipus II. . . . .	19
1.3	Diamagnetisme. . . . .	19
1.4	Diagrama de fases d'un superconductor tipus I. . . . .	20
1.5	Diagrama de fases d'un superconductor tipus II. . . . .	20
1.6	Estructura cintes 1G. . . . .	21
1.7	Cinta superconductora Tipus 2G. . . . .	21
1.8	Esquema cable WD. AMSC [1]. . . . .	23
1.9	Esquema cable CD. AMSC [1]. . . . .	23
1.10	Configuració triaxial. Southwire and nkt cables. . . . .	24
1.11	Tres fases disposades en un mateix criostat. Sumitono. . . . .	24
1.12	Sistemes auxiliars necessaris pel funcionament del cable. AMSC [1]. . . . .	25
2.1	Tipologia de cable escollida. . . . .	27
2.2	Secció de la distribució de les cintes en el model monobloc. . . . .	28
2.3	Esquema Equivalent PI. . . . .	31
3.1	Xarxa original utilitzada. . . . .	34
3.2	Xarxa utilitzada per al desenvolupament i prova del cable superconductor. . . . .	35
3.3	Subrutines CONEC i CONET. . . . .	35
3.4	Etaques de la simulació dinàmica. . . . .	36
4.1	Detall de la xarxa utilitzada. Curtcircuit. . . . .	40
4.2	Evolució de la resistència. . . . .	40
4.3	Evolució de la intensitat. . . . .	41
4.4	Evolució de les pèrdues. . . . .	42
4.5	Evolució de la temperatura. . . . .	43



4.6	Evolució de la tensió. . . . .	45
4.7	Evolució de la desviació de la freqüència. . . . .	45
4.8	Evolució de la potència vista al nus 1. . . . .	46



# Índex de taules

1.1	Evolució històrica dels material superconductors [2]. . . . .	18
4.1	Comparativa del règim d'operació de diferents models superconductors . . . .	47
B.1	Paràmetres geomètrics del cable . . . . .	55
B.2	Paràmetres tèrmics i físics dels cable . . . . .	55
D.1	Pressupost del hardware . . . . .	59
D.2	Pressupost del software. . . . .	59
D.3	Pressupost de la mà d'obra. . . . .	60
D.4	Suma total del pressupost. . . . .	60







# Glossari

## Símbols

$V_f$	Tensió fase-neutre del nus final del cable, [kV]
$V_o$	Tensió fase-neutre del nus origen del cable, [kV]
$B_{c1}$	Densitat de flux magnètic crítica inferior, superconductor tipus II, [T]
$B_{c2}$	Densitat de flux magnètic crítica superior, superconductor tipus II, [T]
$B_c$	Densitat de flux magnètic crítica, superconductor tipus I, [T]
$B_t$	Susceptància transversal total, [S]
$b_t$	Susceptància transversal total, [p.u.]
$C$	Capacitat per unitat de longitud, [nF/km]
$f$	Freqüència del corrent i la tensió sinusoidal [Hz]
$I_c$	Corrent crític del cable superconductor, [A]
$I_{nom}$	Corrent nominal per fase del cable superconductor, [A rms]
$I_p$	Valor de pic del corrent del cable, [A]
$I_{rms}$	Valor eficaç del corrent del cable, [A]
$I_{trans}$	Corrent eficaç de transició a l'estat dissipatiu $I_p > I_c$ , [A rms]
$J_c$	Densitat de corrent crític, [A/mm <sup>2</sup> ]
$K_1$	Constant empírica de la resistència equivalent quan $I_p < I_c$ , [W/m/A <sup>q1</sup> ]
$k_1$	Constant empírica de les pèrdues quan $I_p < I_c$ , [W/m/A <sup>q1</sup> ]
$K_2$	Constant empírica de la resistència equivalent quan $I_p > I_c$ , [W/m/A <sup>q2</sup> ]
$k_2$	Constant empírica de les pèrdues quan $I_p > I_c$ , [W/m/A <sup>q2</sup> ]
$L$	Inductància per unitat de longitud, [mH/km]
$l$	Longitud del cable o línia superconductora, [km]
$P_{AC}$	Pèrdues en corrent altern, [W/m/fase]
$P_{fo}$	Flux de potència activa trifàsica transmès al cable des del nus final, [MW]
$P_{of}$	Flux de potència activa trifàsica transmès al cable des del nus origen, [MW]



$q_1$	Exponent de les pèrdues quan $I_p < I_c$
$q_2$	Exponent de les pèrdues quan $I_p > I_c$
$R$	Resistència per unitat de longitud, $[\Omega/\text{km}]$
$r_1$	Radi interior del conductor de fase, $[\text{mm}]$
$r_2$	Radi exterior del conductor de fase, $[\text{mm}]$
$r_s$	Radi mitjà de la pantalla, $[\text{mm}]$
$R_t$	Resistència sèrie total, $[\Omega]$
$r_t$	Resistència sèrie total, [p.u.]
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i> , valor eficaç
$T_c$	Temperatura crítica o de transició, $[\text{K}]$
$V_{nom}$	Tensió fase-fase nominal del cable superconductor, $[\text{kV}]$
$X_t$	Reactància sèrie total, $[\Omega]$
$x_t$	Reactància sèrie total, [p.u.]
$Z_b$	Impedància base del cable
$Z_b$	Intensitat base
$Z_b$	Potència base, $[\text{MVA}]$
$Z_b$	Tensió base, $[\text{V}]$

### Símbols grecs

$\lambda$	Profunditat de penetració del camp magnètic, $[\text{nm}]$
$\mu_0$	Permeabilitat magnètica del buit, $4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H/m}]$
$\omega$	Freqüència angular del corrent i la tensió sinusoidal, $[\text{rad/s}]$
$\rho$	Resistivitat elèctrica equivalent del material superconductor, $[\Omega \cdot m]$
$\theta$	Angle d'enrotllament de les cintes respecte a l'eix del cable, $[\text{rad}]$
$\epsilon_0$	Permitivitat elèctrica del buit $1/36/\pi \cdot 10^{-9} [\text{F/m}]$
$\epsilon_r$	Permitivitat elèctrica relativa del dielèctric

### Acrònims

1G	Superconductor de primera generació
2G	Superconductor de segona generació
AC	<i>Alternating Current</i> , corrent altern
AMSC	<i>American Superconductor Corporation</i>
BSCCO	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
CC	<i>Coated Conductor</i> , cintes metàl·liques amb recobriment superconductor



- CD *Cold Dielectric*, dielèctric a temperatura criogènica
- HTS *High Temperature Superconductor*, superconductor d'elevada temperatura crítica
- LTS *Low Temperature Superconductor*, superconductor de baixa temperatura crítica
- PPLP *PolyPropylene Laminated Paper*, paper laminat de poli-propilè
- PSS<sup>TM</sup>E *Power System Simulator for Engineering*
- VLI *Very Low Impedance*, impedància molt baixa
- WD *Warm Dielectric*, dielèctric a temperatura ambient
- XLPE Polietilè reticulat
- YBCO  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$





# Prefaci

L'increment de la demanda elèctrica que s'ha donat en els darrers anys i que es donarà durant els pròxims anys [3] fa que s'hagin de modernitzar moltes infraestructures elèctriques. Aquestes infraestructures estan compostes bàsicament, per dos grans components del sistema elèctric.

- Instal·lacions productores d'energia.
- Sistemes de transport i distribució.

En referència al segon punt, la construcció de noves instal·lacions per al transport i distribució de l'energia elèctrica comporta la degradació del medi a més de ser cada vegada més complicat i costós degut a la preservació del territori. Tot plegat, junt a una consciència social que es mostra contrària a totes les infraestructures que modifiquin el seu entorn, fa necessari el desenvolupament de tecnologies més compactes i a la vegada que permetin el transport de més potència. Amb aquesta finalitat els cables superconductors representen l'alternativa més vàlida (veure figura 1).

La gran capacitat de transport que permet el cable superconductor fa que presenti unes qualitats òptimes per portar a terme aquest objectiu. La gran densitat de potència que permet que circuli per un cable superconductor permet transportar o distribuir molta potència a tensions més baixes del que s'hauria de fer amb les tecnologies convencionals. Existeixen diferents configuracions típiques (veure apartat 1.3) que redueixen molt la secció transversal convertint-lo així en una opció molt ambiciosa per entrar en funcionament en àmbits urbans o en altres ubicacions on l'espai físic pugui tenir un valor econòmic important.

Tot i els avantatges mencionats anteriorment, existeixen inconvenients a la instal·lació de cables superconductors.

- Presència d'un sistema de refrigeració per operar a temperatures criogèniques.
- Cost elevat del material superconductor.
- Dificultat de fabricació de cintes superconductores de gran longitud

Els estudis del comportament dinàmic de la xarxa es realitzen per comprovar l'estabilitat de la xarxa elèctrica enfront a perturbacions [4]. L'estabilitat d'un sistema ve determinada per la capacitat de, després de sofrir un pertorbació, tornar al règim normal de funcionament (o molt proper). La integració d'un cable superconductor a la xarxa elèctrica provoca una variació en el comportament dinàmic del sistema. Per poder conèixer el comportament dinàmic amb una determinada certesa és necessari modelar tots i cadascun els elements i dispositius que integren el sistema elèctric de la manera més aproximada possible.



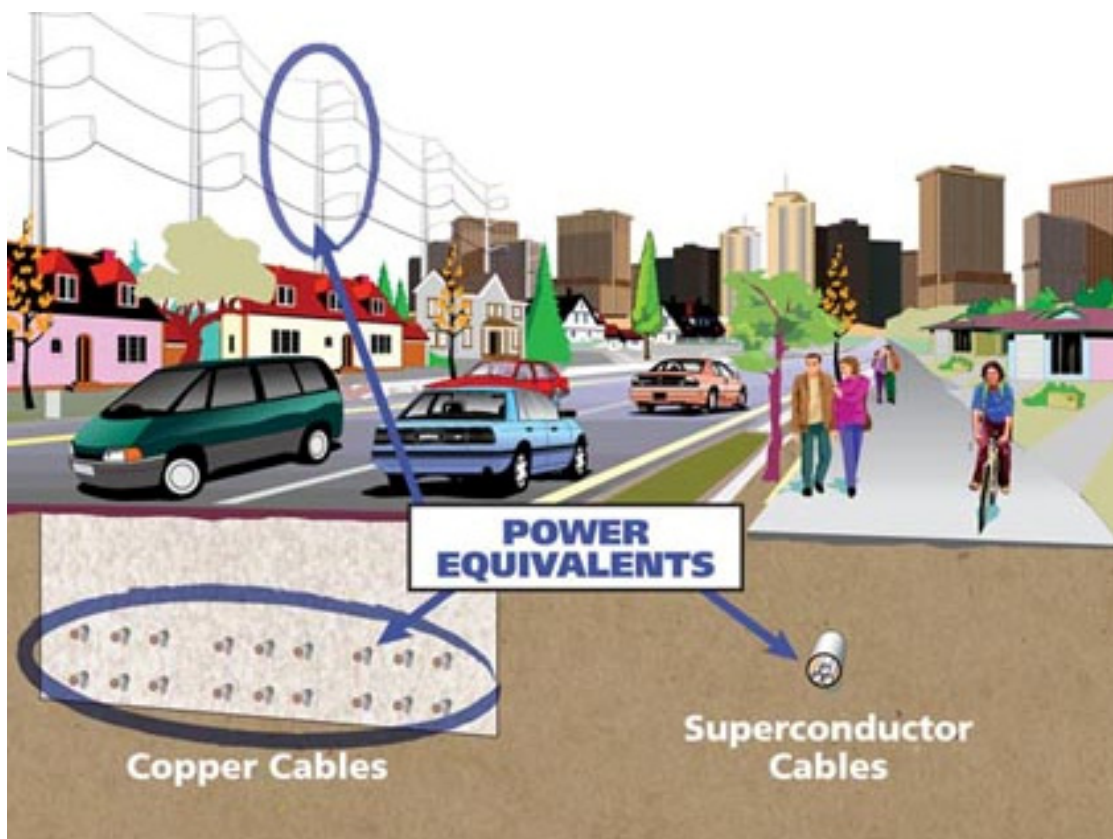


Figura 1: Sistemes elèctrics equivalents. AMSC [1].



# Introducció

## Objectius del Projecte

L'objectiu d'aquest Projecte Fi de Carrera és el desenvolupament d'un model dinàmic d'un cable superconductor. Aquest consisteix en un codi escrit amb el llenguatge de programació FORTRAN que té per missió canviar el valor de la resistència en l'esquema equivalent PI del cable.

El programari utilitzat, PSS<sup>TM</sup>E, permet incorporar models dinàmics dels elements que constitueixen tot el sistema elèctric. Aquests models tant poden ser propis del programa o també poden ser creats per els usuaris (aquests es coneixen com a models d'usuari). Aquests models dinàmics poden comprendre temàtiques tan diverses com són els generadors convencionals o eòlics fins a relés de protecció.

Durant el desenvolupament del projecte s'ha transcorregut per diferents etapes. Aquestes es poden desglossar com:

- Familiarització amb l'entorn de PSS<sup>TM</sup>E i llenguatge FORTRAN.
- Anàlisi del circuit equivalent o model PI de línia.
- L'obtenció de les expressions matemàtiques de la resistència  $R$ , pèrdues i temperatura de les cintes d'un cable superconductor.
- Descripció i redacció del model .

Una vegada portats a terme tots i cadascun de les etapes anteriors s'arriba a l'objectiu del Projecte. El model dinàmic del cable superconductor serà una eina útil en l'estudi de sistemes elèctrics on aquesta tecnologia sigui instal·lada.

## Antecedents

Abans de la realització d'aquest Projecte Fi de Carrera sols s'han desenvolupat un parell de projectes relacionats. Es tracta del projecte *Estudi de l'impacte dels cables superconductors de molt baixa impedància a la xarxa elèctrica* realitzat per Gerard del Rosario. En aquest projecte es tracta el cable superconductor des de el punt de vista estàtic, en règim permanent. Aquest projecte és el punt de partida ja que, per poder fer estudis en règim dinàmic, primerament es necessita una xarxa on la solució convergeixi, o sigui, que es tingui un valor de tots els paràmetres que defineixin l'estat i punt de funcionament d'un sistema elèctric (tensió dels bussos, intensitat que circula per les línies,...). El segon projecte és *Impacto de*



*un cable superconductor sobre la eficiència energètica de la red elèctrica* realitzat per Olivier Romedenne que realitza un estudi de l'impacte des del punt de vista energètic.

## Abast del Projecte

La finalitat d'aquest Projecte Fi de Carrera és desenvolupar el model dinàmic d'un cable superconductor donant a conèixer variables (temperatura de les cintes, pèrdues, resistència, intensitat,...) que influeixen en el comportament del superconductor o del sistema elèctric. La finalitat d'aquest treball és poder realitzar simulacions RMS dinàmiques amb el programa PSS<sup>TM</sup>E en un sistema elèctric on s'hagin instal·lat aquesta tecnologia de cables.





# Capítol 1

## La superconductivitat

En aquest capítol es fa una presentació de la superconductivitat i el que representa. A partir de les propietats de cada material i configuració s'ha arribat a escollir una opció per al desenvolupament del cable superconductor.

### 1.1 La superconductivitat

La superconductivitat és un estat termodinàmic que presenten alguns materials que consisteix en que per sota d'una temperatura, coneguda com a temperatura crítica o de transició ( $T_c$ ) i per sota d'un valor de camp magnètic ( $B_c$ ) presenta una resistència elèctrica nul·la o molt petita i diamagnetisme.

Es diu que el material està en estat normal o resistiu quan el material superconductor està per sobre la temperatura crítica. A més de la temperatura, si sotmetem al cable superconductor per sobre una determinada intensitat coneguda com a crítica  $I_c$  provoca la no-superconductivitat. Els materials superconductors són elements de la taula periòdica o materials ceràmics. Una peculiaritat que presenten, com a norma general, és que a temperatura ambient normalment no es caracteritzen per ser bons conductors (la plata, el coure i l'or no presenten aquest estat mentre que l'alumini la presenta a temperatures inferiors a 1,2K). A la taula 1.1 s'il·lustra una evolució històrica així com les temperatures crítiques dels elements més habituals que presenten l'estat de superconductivitat.

### 1.2 Classificació de superconductors

De la taula anterior 1.1 es pot fer una divisió en dos grups. El primers que es descobriren se'ls coneix amb el nom de superconductors de baixa temperatura (*Low Temperature Superconductor*, LTS). Tenen la caracterització de tenir les temperatures crítiques entre 20-40K. Aquests conjunt de materials presenten, en l'estat normal, una dependència de la resistivitat de cinquè ordre respecte la temperatura ( $\rho \propto T^5$ )

Enfront aquest conjunt es presenta els que es coneix com a superconductors d'alta temperatura (*High Temperature Superconductor*, HTS). Aquests tenen la propietat de que la temperatura crítica es troba entorn dels 90-100K. Des d'un punt de vista pràctic es diu que els superconductors d'alta temperatura crítica són aquells que presenten l'estat de superconductivitat si són refredats amb nitrogen líquid. A diferència dels superconductors LTS,



Taula 1.1: Evolució històrica dels material superconductors [2].

Material	$T_c$ [K]	Any
Hg	4,1	1911
Pb	7,2	1913
Nb	9,2	1930
$NbN_{0,96}$	15,2	1950
$Nb_3Sn$	18,1	1954
$Nb_3(Al_{\frac{3}{4}}Ge_{\frac{1}{4}})$	20–21	1966
$Nb_3Ga$	20,3	1971
$Nb_3Ge$	23,2	1973
$Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_y$	30–35	1986
$(La_{0,9}Ba_{0,1})_2CuO_{4-\delta}$ a 1 GPa	52	1986
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	95	1987
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	1988
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125	1988
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ a 7 GPa	131	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$	133	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ a 25 GPa	155	1993
$Hg_{0,8}Pb_{0,2}Ba_2Ca_2Cu_3O_x$	133	1994
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ a 30 GPa	164	1994

aquest presenten una dependència lineal enfront a la temperatura ( $\rho \propto T$ ). A la figura 1.1 s'observa el comportament dels diferents materials superconductors (LTS i HTS).

Una altre classificació de superconductors és aquella que es basa amb el comportament magnètic del material. Si el material presenta sempre diamagnetisme perfecte s'anomenen de tipus I mentre que si el camp magnètic pot penetrar parcialment en el material s'anomenen de tipus II. El diamagnetisme significa que les línies de camp externes no penetrin en el material (vegis figura 1.2. Aquesta propietat es mostra de la forma en que aquests materials són repel·lits per imants. És la propietat oposada al ferromagnetisme, que són atrets pels imants. La figura 1.3 il·lustra l'efecte de la repulsió entre els dos materials.

Els materials tipus I són els que exclouen totalment el camp del seu interior. Per aquesta mateixa raó també exclouen el corrent. Per aquesta raó el corrent que hi circula ho fa per la superfície exterior. Aquest corrent tan sols penetra una profunditat de l'ordre de 50nm, el que es coneix com *penetration depth*. A la figura 1.4 s'observa les diferents fases sota les quals treballa el superconductor tipus I.

Els superconductors tipus II són conductors perfectes de l'electricitat. A diferència dels tipus I, que sempre exclouen el flux magnètic, aquest no sempre l'exclouen. A valors de flux inferiors al primer flux crític  $B_{c1}$  el material té la capacitat d'excloure el flux del seu interior mentre que per a valors més grans de camp magnètic el diamagnetisme no és perfecte. En la situació en que el superconductor no pot excloure el camp es coneix com a fase *mixta*. Existeix un segon valor crític  $B_{c2}$  que diferencia la fase mixta de la normal. La figura 1.5 representa d'una forma molt simplificada les diferents fases del superconductor tipus II. D'aquesta forma es poden observar tres situacions en funció del camp magnètic: fase Meissner amb diamagnetisme perfecte, fase mixta i fase normal.

Dins els conductors tipus II, encara que tots estan formats a partir d'òxids de coure, podem fer una subdivisió entre:

- Superconductors de primera generació (1G).



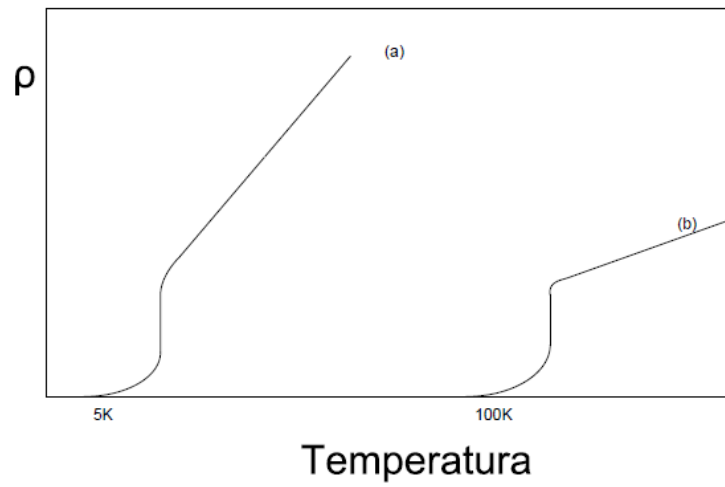


Figura 1.1: Resistivitat de superconductors tipus I (a) i tipus II (b).

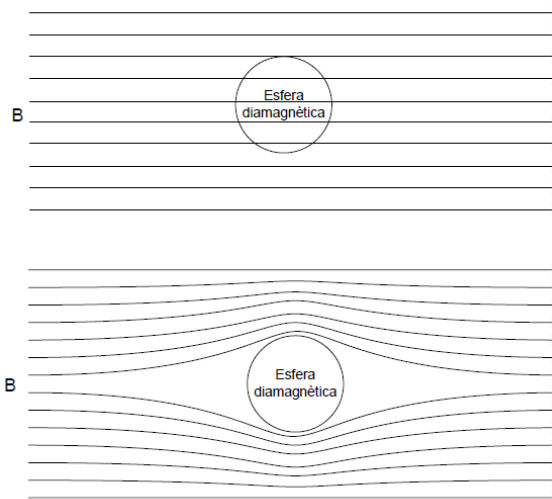


Figura 1.2: Diferència magnetisme entre tipus I i tipus II.



Figura 1.3: Diamagnetisme.



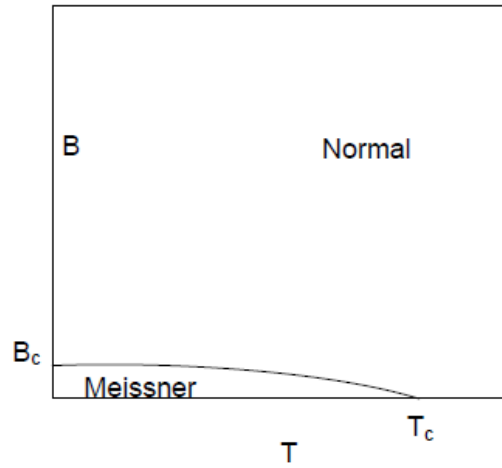


Figura 1.4: Diagrama de fases d'un superconductor tipus I.

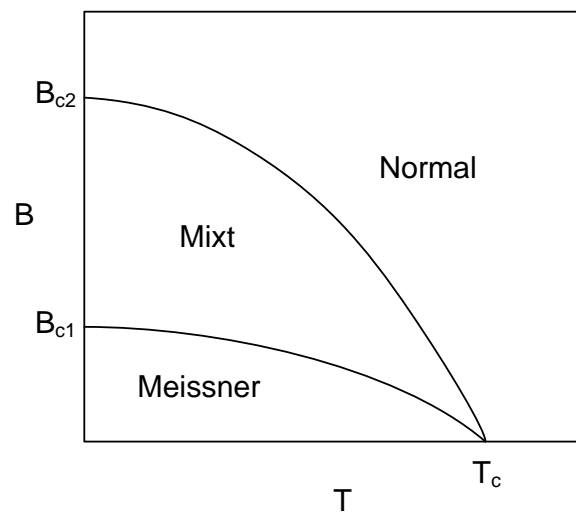


Figura 1.5: Diagrama de fases d'un superconductor tipus II.



- Superconductors de segona generació (2G) o *Coated Conductors*.

Encara que el dos comparteixin un denominador comú, l'òxid de coure, la composició química és diferent. Els de primera generació, 1G estan formats per compostos com el  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , i es denominen BSCCO, o Bi-**2223**. A la taula 1.1 desglossa els materials superconductors més habituals. Aquesta generació de conductors tenen la característica de que les cintes superconductores es fabriquen mitjançant filaments de BSCCO insertats en una matriu de plata o aliatge semblant. Aquestes cintes estan protegides per una capa de  $200\ \mu\text{m}$  per protegir les cintes d'esforços mecànics (a les corbes el cable sofreix una distorsió que modifica el comportament). Aquest recobriments no te cap funció elèctrica. A la figura 1.6 s'observa el resultat final de la composició de les cintes superconductores.

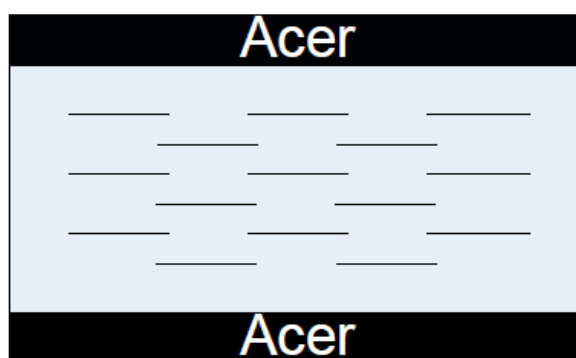


Figura 1.6: Estructura cintes 1G.

A diferència dels primers, els de segona generació, 2G o *Coated Conductors*, presenten una composició lleugerament diferent. Aquests estan format per materials com  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  o altres compostos amb terres rares<sup>1</sup> i es denominen YBCO o Y-**123**. Aquestes cintes es formen mitjançant la unió de diferents capes, com il·lustra la figura 1.7, començant per la inferior de níquel-tungsté, acer o aliatges similars, la capa superconductora recobertes per una altre capa de algun metall noble.



Figura 1.7: Cinta superconductora Tipus 2G.

Aquestes cintes es disposaran com s'explica en la figura 1.3 per poder aprofitar les seves magnífiques qualitats en referència al seu bon comportament com a conductor elèctric. A continuació s'explica la forma com es col·locaran per poder-se aprofitar com a fases de línies elèctriques.

<sup>1</sup>Denominació amb el que es coneixen els òxids dels metalls de la família dels lantànids.



### 1.3 Tipologies de cable

Diferències apart, tots els cables superconductors tenen uns elements comuns. Genèricament, encara que segons la configuració poden veure's alterades, els elements que formen el cable són els següents:

- Nucli.
- Conductor de fase (format per cintes superconductores).
- Dielèctric.
- Pantalla.
- Criostat.
- Coberta.

El nucli és un conductor de coure, tant pot ser trenat com un tub rígid, que circula  $LN_2$  on s'hi enrotllen les cintes superconductores. Aquestes, segons la seva tecnologia, poden ser 1G o 2G. La funció d'aquest nucli de coure és el de crear una sustentació a les cintes com permetre la conducció de corrent durant les faltes (el nucli condueix electricitat durant les faltes ja que les cintes perden l'estat superconductor). En aquest instant l'ordre de magnitud de la resistència de les cintes és igual a la del nucli.

El dielèctric és l'element que s'encarrega d'aïllar elèctricament el conductor de la resta de les parts (pantalla, altres conductors i altres parts metàl·liques). Aquest element normalment és de PPLP (*Polypropylene Laminated Paper*) impregnat de  $LN_2$  ja que, a més de ser el refrigerant, té molt bones propietats dielèctriques.

La pantalla és una capa de material conductor (o també superconductor, segons l'estructura utilitzada) que té per objectiu confinar el camp elèctric. D'aquesta manera es aconseguixen unes condicions simètriques en tot el conductor i el dielèctric. En el cas de ser superconductora, també confina el camp magnètic degut a la propietat diamagnètica.

El criostat és l'aïllant tèrmic dels conductors. Està format per dues capes de metall entre les quals s'hi ha fet el buit, el qual té molt bones propietats aïllants. Separa, segons la tipologia del cable, com mostra la figura 1.8 i la figura 1.9 l'espai ocupat per el  $LN_2$  a temperatura criogènica (aproximadament 80K) i l'ambient a una temperatura de  $20^\circ C$ .

Finalment, el component restant és la coberta. Està constituïda per metalls com l'acer i té per funció protegir el cable, o diversos cables, que puguin contenir el criostat. A més, normalment està protegida (pel·lícula de pintura o elastòmer) per evitar la corrosió o l'efecte d'agents externs.

Existeixen dos grans configuracions de cables que es diferencien per les condicions de treball del dielèctric. Aquestes són:

- *Warm Dielectric (WD)*, Dielèctric a temperatura ambient, figura 1.8.
- *Cold Dielectric (CD)*, Dielèctric a temperatura criogènica, figura 1.9.

En les figures 1.8 i 1.9 es pot veure que la diferència entre les dues configuracions és la posició relativa entre el dielèctric i el criostat. Mentre en la CD el criostat engloba el conductor i dielèctric, en el WD és el dielèctric que ho engloba.



Econòmicament parlant, el WD té l'avantatge d'una menor utilització de cinta superconductora. El WD utilitza una pantalla de coure, en canvi el CD utilitza cintes superconductores. A la realitat, encara que els tipus CD presenten un cost major, tenen l'avantatge de tenir una inductància molt més petita (entre 5 o 6 vegades). Això provoca que aquesta tipologia sigui més habitual.

Dins la tipologia CD podem trobar diverses configuracions, en el que es refereix la distribució de als conductors dins el criostat. Les figures 1.10, 1.11 i 1.12 il·lustren les configuracions més típiques.

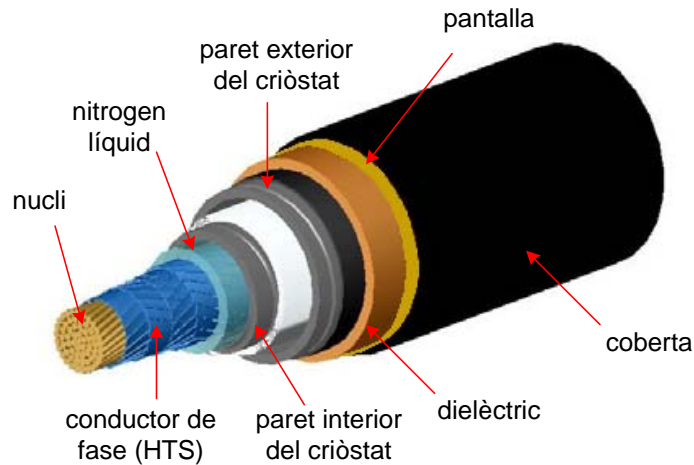


Figura 1.8: Esquema cable WD. AMSC [1].

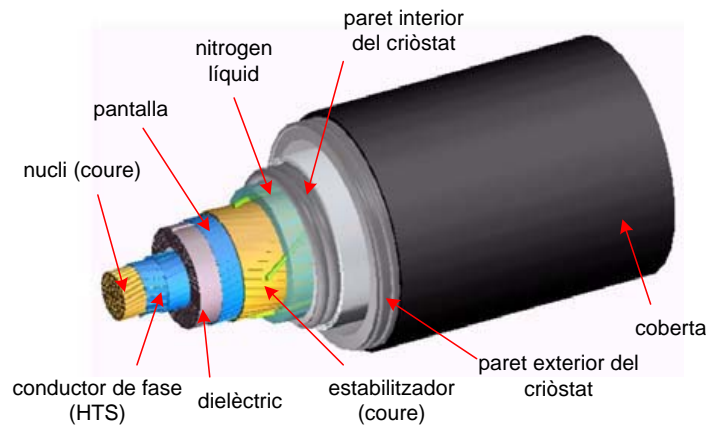


Figura 1.9: Esquema cable CD. AMSC [1].

La primera d'elles, com mostra la figura 1.10, consisteix en un cable triaxial. Consisteix en disposar els tres conductors de fase concèntrics (amb les seves respectives pantalles i dielèctrics). La característica principal és la seva compacitat causada per l'existència d'una pantalla i criostat que envolta les tres fases. A canvi té la desavantatge de que les resistències i inductàncies de les tres fases no seran igual, cosa que desequilibra el sistema de tensions.

En la figura 1.11 es veu com estan disposades les tres fases en un mateix criostat. Tot i que no és tan compacte com la primera encara compartim un mateix criostat per les tres fases.

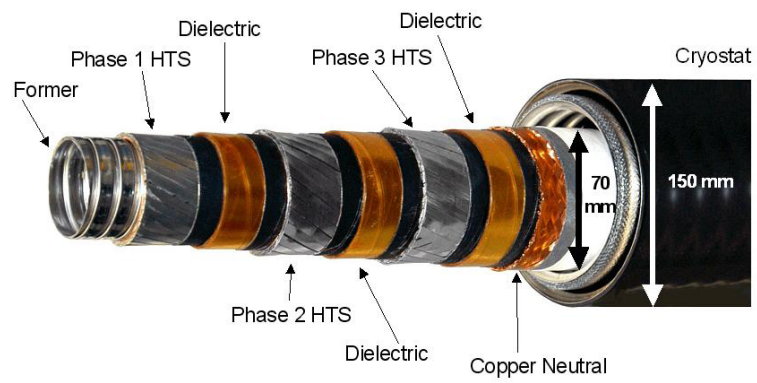


Figura 1.10: Configuració triaxial. Southwire and nkt cables.



Figura 1.11: Tres fases disposades en un mateix criostat. Sumitomo.





La tercera és disposar cada fase en un criostat independent. Té l'avantatge de que les inductàncies són independents entre si però la configuració és la menys compacte, i a part de que el cost és superior ja que s'ha de disposar d'una pantalla i un criostat per a cada fase. Les dues darreres i especialment la darrera configuració són més adients per a funcionar a alta tensió.

Finalment falta descriure uns elements com són el sistema de refrigeració del  $LN_2$ , terminals, sistema de monitorització o les proteccions referides tant al cable superconductor com a la xarxa. La figura 1.12 fa idea de la complexitat que tenen aquests sistemes.

El present projecte no té com a finalitat realitzar estudis sobre aquests sistemes auxiliars; queden definits al capítol 4.2.2 treballs futurs relacionats amb aquest projecte.



Figura 1.12: Sistemes auxiliars necessaris pel funcionament del cable. AMSC [1].



## Capítol 2

# Modelat del cable superconductor

El el present capítol es fa una descripció dels paràmetres corresponents a un cable superconductor. Per aquesta aplicació s'ha escollit modelar un cable superconductor del tipus 1G (del tipus Bi2223). Encara que els de segona generació, 2G, presentin avantatges econòmiques i constructives, la dificultat que existeix alhora de trobar dades reals sobre els paràmetres del cable (estan recollits a l'apèndix B) s'ha cregut oportú que és millor modelar un cable de primera generació, 1G.

La tipologia escollida per el desenvolupament model és la de tres fases disposades en un mateix criostat. La figura 2.1 il·lustra la configuració i les parts que la conformen.

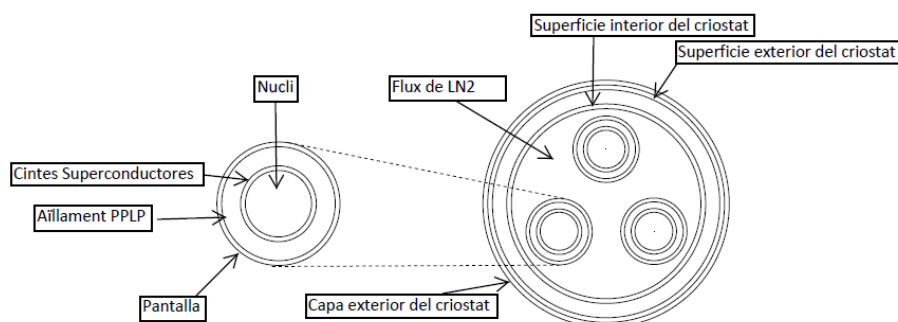


Figura 2.1: Tipologia de cable escollida.

A continuació es detallen els paràmetres que formen l'esquema equivalent del cable a introduir al programari utilitzat (PSS<sup>TM</sup>E). Aquest model tracta el superconductor com si fos un tub massís (una sola capa, una matriu de plata amb els filaments superconductors incrustats) sense tenir present les diferents capes entre si. La figura 2.2 il·lustra la configuració d'aquest model. Aquest no s'allunya de la realitat ja que les cintes es distribueixen de la forma que quedi el mínim espai possible entre elles perquè sinó es distorsiona el funcionament òptim del conjunt.



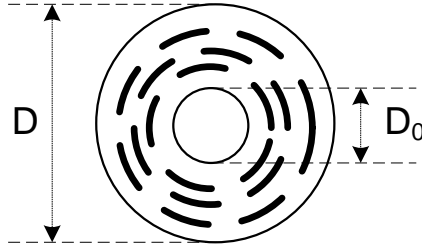


Figura 2.2: Secció de la distribució de les cintes en el model monobloc.

## 2.1 Inductància

L'expressió de la inductància per unitat de longitud és [5]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} (\tan(\theta))^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s}{r_2}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{r_2^4 - r_1^4}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \left[ \frac{r_2^4 - r_1^4}{4} + r_1^4 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - r_1^2 (r_2^2 - r_1^2) \right] \quad (2.1)$$

on:

- $\mu_0$  correspon a la permeabilitat magnètica del buit,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]
- $r_1$  i  $r_2$  són els radis interior i exterior de la fase superconductora, [mm]
- $\theta$  és l'angle d'enrotllament de les cintes respecte l'eix del cable, [rad]
- $r_s$  correspon al radi de la pantalla, [mm]

L'equació 2.1 està composta per tres termes. El primer d'ell fa referència a l'enrotllament entorn al nucli de coure. Aquest terme es considera negligible [5]. El tercer terme fa referència a l'espai que ocupen les cintes superconductores, molt petit comparat amb la secció de la matriu de plata. En definitiva, el terme dominant és el segon. O sigui, que el valor de la inductància depèn principalment del valor  $r_s$  i  $r_2$ , espai entre el conductor i la pantalla. D'aquesta forma podem considerar l'expressió de la inductància com:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s}{r_2}\right) \quad (2.2)$$

## 2.2 Capacitància

La capacitat dels cables és pot obtenir mitjançant l'expressió 2.3, obtinguda de [5]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_s}{r_2}\right)} \quad (2.3)$$

on:

- $\epsilon_0$  correspon a la permitivitat elèctrica del buit,  $1/(36\pi) \cdot 10^{-9}$  [F/m]
- $\epsilon_r$  correspon a la permitivitat elèctrica relativa del material dielèctric, adimensional



La característica geomètrica més important per definir aquest paràmetre és el dielèctric utilitzat així com el gruix que conforma. Un dels dielèctrics més utilitzats amb aquestes finalitats és el PPLP (*Polypropylene Laminated Paper*)[6]. La seva permitivitat relativa és de  $\varepsilon_r = 2,21$ .

## 2.3 Resistència

En aquest apartat es fa una descripció dels passos seguits en l'obtenció del valor de la resistència a introduir en l'esquema equivalent del cable superconductor. El valor d'aquesta resistència varia en funció de dos paràmetres com són la intensitat i la temperatura dels filaments superconductors.

El primer pas consisteix a determinar la temperatura dels filaments superconductors. Per conèixer la temperatura primer cal conèixer les pèrdues mitjançant l'equació 2.4 obtinguda de [7].

$$P = l \cdot \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi \cdot h^2} \cdot f \cdot [(2 - \beta h) \cdot \beta h + 2 \cdot (1 - \beta h) \ln(1 - \beta h)] \quad (2.4)$$

Amb:

$$h = 1 - \frac{r}{R} \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{I(t)}{I_c} \quad (2.6)$$

i

$l$	Longitud del cable
$\mu_0$	Permeabilitat magnètica del cable
$I_c$	Intensitat crítica
$f$	Freqüència
$R$	Radi exterior del superconductor
$r$	Radi interior del superconductor

Per a l'estat de conducció normal, l'expressió és:

$$P(t) = R(t)I^2(t) \quad (2.7)$$

On  $R(t)$  i  $I(t)$  són la resistència equivalent i el corrent que circula pel cable. La resistència equivalent del cable és la composta per la matriu de plata en paral·lel amb el nucli de coure. La resistència del superconductor és menyspreable ja que és molt més gran que la del nucli.

Una vegada definides les pèrdues es calcula la temperatura dels filaments superconductors ( $T(t)$ ) mitjançant:

$$C_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = P(t) - h(\Delta T) \cdot A \cdot \Delta T(t) \quad (2.8)$$

on:

$C_p$	Capacitat calorífica del superconductor
$h(\Delta T)$	Coefficient de convecció entre el superconductor i el $LN_2$
$\Delta T(t)$	Diferència de temperatura entre superconductor i $LN_2$
$P(t)$	Pèrdues del superconductor
$A$	Àrea del superconductor que està en contacte amb el $LN_2$



Una vegada s'ha obtingut la temperatura de les cintes (s'ha suposat que la temperatura dels filaments és igual a la temperatura de la matriu a la qual estan incrustats) és pot calcular la resistivitat dels filaments superconductors. Amb l'expressió 2.9 o 2.10, obtinguda de [8], segons si està en l'estat de superconductivitat o de conducció normal, es calcula el valor de la resistivitat.

$$\rho_{HTS}(t) = \rho_c \cdot \left( \frac{I(t)}{I_c} \right)^{n-1} \cdot \left( \frac{T_c - T_0}{T_c - T(t)} \right)^n \quad (2.9)$$

$$\rho_{HTS}(t) = \alpha_{HTS} \cdot T(t) + \beta_{HTS} \quad (2.10)$$

on:

$\rho_c$	Resistivitat crítica dels filaments superconductors
$T_c$	Temperatura crítica dels filaments superconductors
$T_0$	Temperatura d'operació inicial dels superconductors
$n$	Exponent de la llei de potències
$\alpha_{HTS}$	Coefficient que comptabilitza l'efecte de la dilatació i canvis de temperatura
$\beta_{HTS}$	Coefficient que comptabilitza l'efecte de la dilatació i canvis de temperatura

El valor de la resistivitat del superconductor en estat normal és molt més elevada que la de la matriu de plata. Per aquesta raó es considera que la resistivitat del superconductor en estat normal és menyspreable, tan sols es considera la de la plata. Una vegada es coneix la resistivitat dels filaments superconductors, o de la matriu, només ens falta saber la resistivitat de tota la cinta. Mitjançant l'equació 2.11 es coneixerà la resistivitat total.

$$\rho_{cinta}(t) = \left( \frac{1}{1+r} \rho_{HTS}^{-1} + \frac{r}{1+r} \rho_{MATRIX}^{-1} \right) \quad (2.11)$$

On:

$\rho_{cinta}$	Resistivitat de la cinta superconductora
$\rho_{HTS}$	Resistivitat dels filaments superconductors
$\rho_{MATRIX}$	Resistivitat de la matriu de plata que conté els filaments
$r$	Quocient entre àrea matriu de plata i àrea dels filaments superconductors

Una vegada es coneix la resistivitat de la cinta superconductora tan sols falta saber el valor de la resistència que ofereix la cinta superconductora. Aquesta es coneix mitjançant l'equació 2.12.

$$R = \frac{l}{a \cdot N} \cdot \rho_{cinta}(t) \quad (2.12)$$

a Secció de la cinta

On: N Número de cintes que formes el conductor

R Resistència del cable superconductor

## 2.4 Esquema equivalents del cable

Una vegada es saben quins són els paràmetres a introduir al programari s'estudiarà com introduir-los. El PSS<sup>TM</sup>E utilitza l'esquema equivalent en PI 2.3. Els valors calculats anteriorment ( a la secció 2.1 i 2.2 es necessiten per calcular la reactància i la susceptància mentre



que la resistència 2.3 s'introdueix directament. La reactància i la susceptància es calculen d'aquesta forma

$$X_t = (\omega \cdot L) \cdot l = 2\pi fL \cdot l \quad (2.13)$$

$$B_t = (\omega \cdot C) \cdot l = 2\pi fC \cdot l \quad (2.14)$$

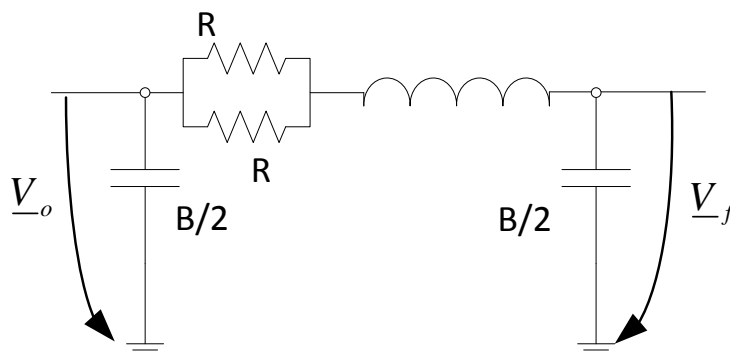


Figura 2.3: Esquema Equivalent PI.

Aquest paràmetres és poden introduir directament, amb valors reals, o en tant per un (pu). La importància d'aquest detall no va més lluny d'aquí però pot crear confusió al programa ja que pot estar configurat de les dues formes. En aquest projecte s'ha escollit els p.u. ja que és més habitual.

De l'esquema equivalent PI clàssic hi ha una petita variació que és la resistència corresponent al nucli de coure. El nucli de coure té dues funcions. La primera d'elles és de servir com a subjecció a les cintes superconductores (aquestes hi van enrotllades). La segona, és limitar el corrent que circula per superconductor durant les faltes. L'ordre de magnitud d'aquesta resistència fa només tingui sentit considerar-la mentre es produeix la falta ja que per intensitats de corrents inferiors a la crítica aquest nucli pràcticament no condueix (la resistència oferida és unes 35 vegades superior a la que ofereix la cinta superconductora).







## Capítol 3

# Anàlisi de sistemes elèctrics en PSS<sup>TM</sup>E

En aquest capítol s'intenta fer una breu descripció del sistema de funcionament del PSS<sup>TM</sup>E i l'entorn que l'envolta. Aquest és un programa d'anàlisi de sistemes elèctrics de potència molt complet i relativament complex. De fet és el que utilitzen la major part de les empreses de transport i distribució d'energia elèctrica.

### 3.1 Anàlisi en règim permanent

El primer pas a fer alhora de realitzar simulacions dinàmiques és definir una xarxa, o escenari en règim permanent. En el present projecte s'ha optat per usar una xarxa pròpia del programari utilitzat fent-li un petit canvi. S'ha emprat la xarxa *savnw.sav* 3.1, pròpia del PSS<sup>TM</sup>E on s'ha modificat un nus (bus número 1) així com també s'ha desconnectat el transformador entre el nus 3008 i el nus 1. S'ha utilitzat aquesta xarxa degut a la dificultat que té aconseguir xarxes reals degut a clàusules de confidencialitat. La línia entre aquest nus i el nus 3018 és la que s'ha definit com a superconductora. A la figura 3.2 s'il·lustra la modificació de la xarxa.

Per ajustar els paràmetres en règim permanent del cable superconductor en funció de la intensitat que circula per ell, s'ha usat un algorisme dissenyat per Gerard del Rosario [9].

Per ajustar els paràmetres es resol el flux de càrrega mitjançant l'algorisme de Newton-Raphson (veure apèndix A i s'ajusten els paràmetres del cable fins que s'arriba a la solució), on la intensitat que circula per el cable correspon amb la resistència oferida pel cable. En el sistema elèctric utilitzat en aquest Projecte, l'algorisme de resolució no influeix en la solució del flux de càrrega ja que la reduïda dimensió de la xarxa fa que qualsevol algorisme sigui vàlid. En canvi en sistemes reals o en una xarxa gran pot ser d'especial interès ja que cada mètode de resolució té unes particularitats i finalitats.

Finalment, per a poder començar a fer simulacions dinàmiques falta convertir les càrregues i els generadors. Les primeres, on la potència activa i la reactiva són constants es converteixen a una càrrega IZ, on la part activa es converteix a intensitat constant, i la part reactiva a impedància constant. Els generadors es converteixen com a font de corrent, o sigui, pel seu equivalent Norton.



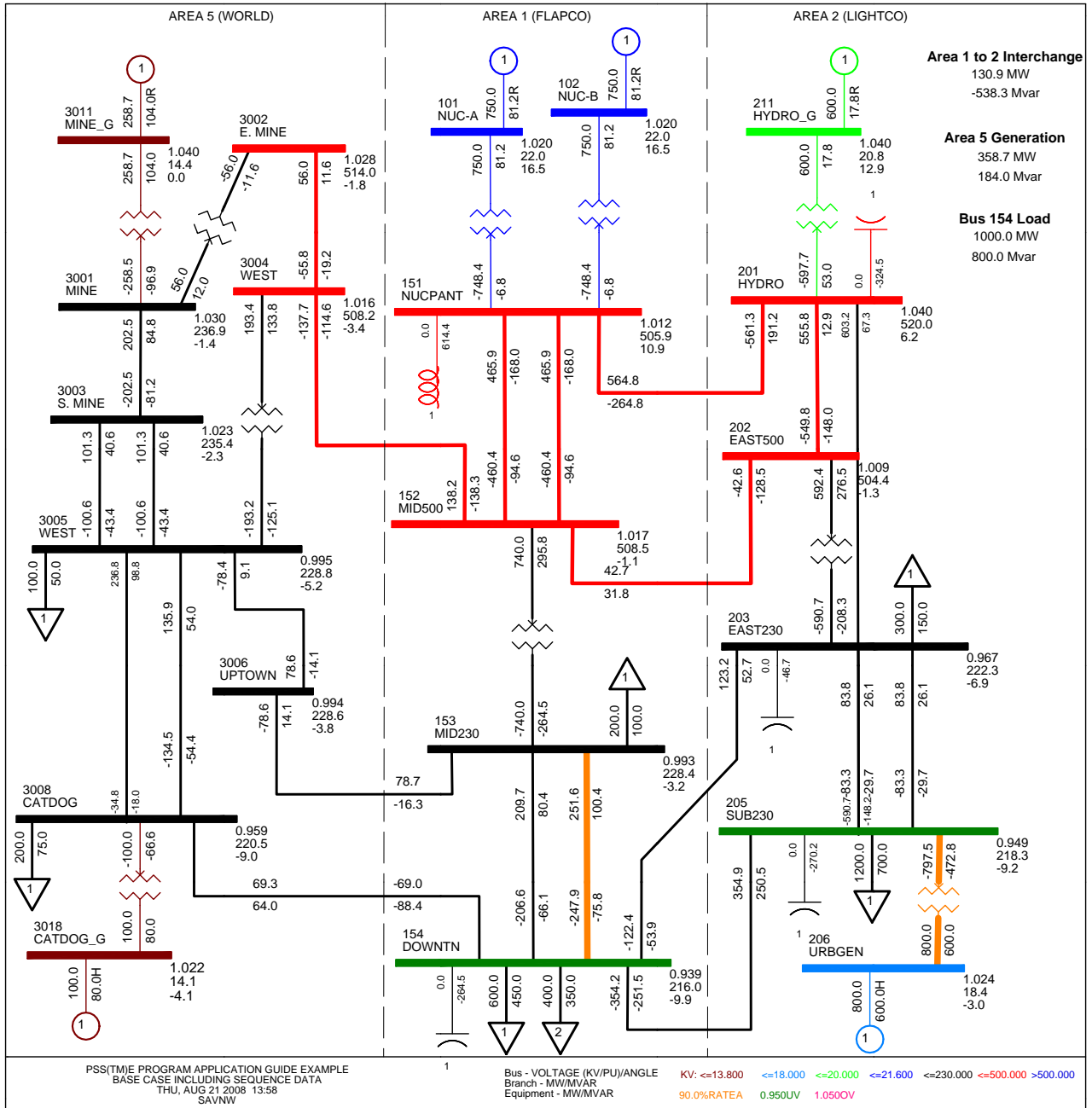


Figura 3.1: Xarxa original utilitzada.



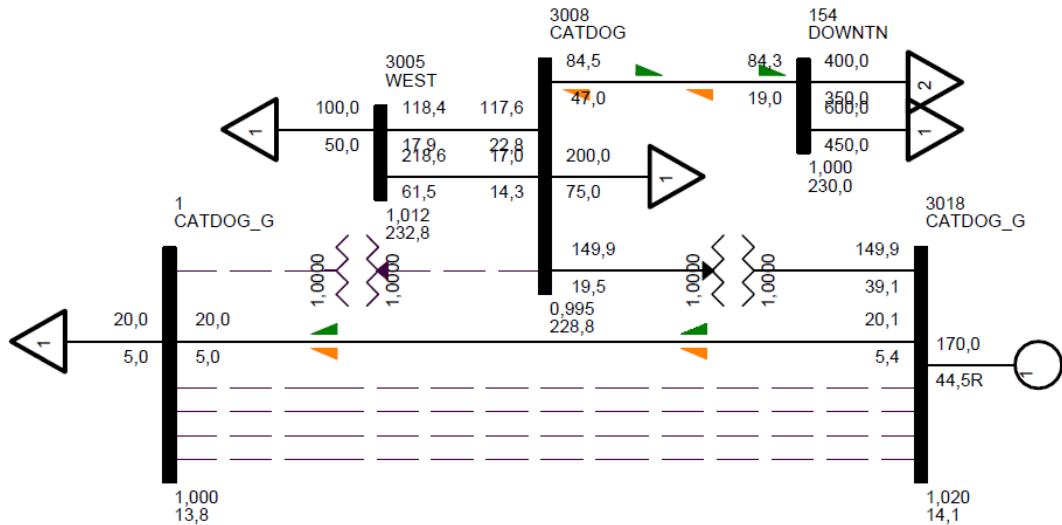


Figura 3.2: Xarxa utilitzada per al desenvolupament i prova del cable superconductor.

### 3.2 Anàlisi i model dinàmic

Una vegada es té la xarxa amb les càrregues i els generadors convertits, es poden introduir els models i paràmetres dinàmics que el sistema elèctric que s'estudia necessita. Aquest models i paràmetres s'introdueixen des d'un arxiu amb el format .dyr mitjançant les subrutines CONEC i CONET. Aquestes subrutines s'observen a la figura 3.3.

```

SUBROUTINE CONEC                                SUBROUTINE CONET
C                                                C
C   INCLUDE 'COMON4.INS'                        C   INCLUDE 'COMON4.INS'
C                                                C
C   CALL MJGSSC (                                C   IF (.NOT. IFLAG) GO TO
1, 178, 64, 9)                                C   9000
C                                                C
C   RETURN                                       C   NETWORK MONITORING MODELS
C   END                                         C
C                                                C
C                                                C   9000 CONTINUE
C                                                C
C                                                C   RETURN
C                                                C   END
    
```

Figura 3.3: Subrutines CONEC i CONET.

#### 3.2.1 Modelat dels elements de la xarxa de proves

La xarxa utilitzada en el desenvolupament d'aquest projecte utilitza models propis del PSS<sup>TM</sup>E en referència als models dels generadors. No utilitza cap altre dispositiu que sigui necessari utilitzar models dinàmics. En referència al model de cable superconductor, tenim el model que, juntament amb les subrutines CONEC i CONET s'ha de compilar i muntar. D'aquesta manera obtenim una llibreria dinàmica (format.dll) que el PSS<sup>TM</sup>E la carrega.



Amb aquesta llibreria dinàmica, juntament amb la xarxa, els models i paràmetres dinàmics, ja es podrà portar a terme la simulació.

### 3.2.2 Estructura de la simulació dinàmica

Durant la simulació dinàmica el comportament del sistema està descrit per un conjunt d'equacions diferencials. A cada pas d'integració, es calculen les derivades dels estats que, una vegada s'han calculat les variables internes del model, es calculen els nous paràmetres del sistema, o sigui, s'han actualitzat els valors elèctrics pel pas d'integració futur. A la figura 3.4 s'il·lustra d'una forma molt senzilla el procediment de la simulació dinàmica.

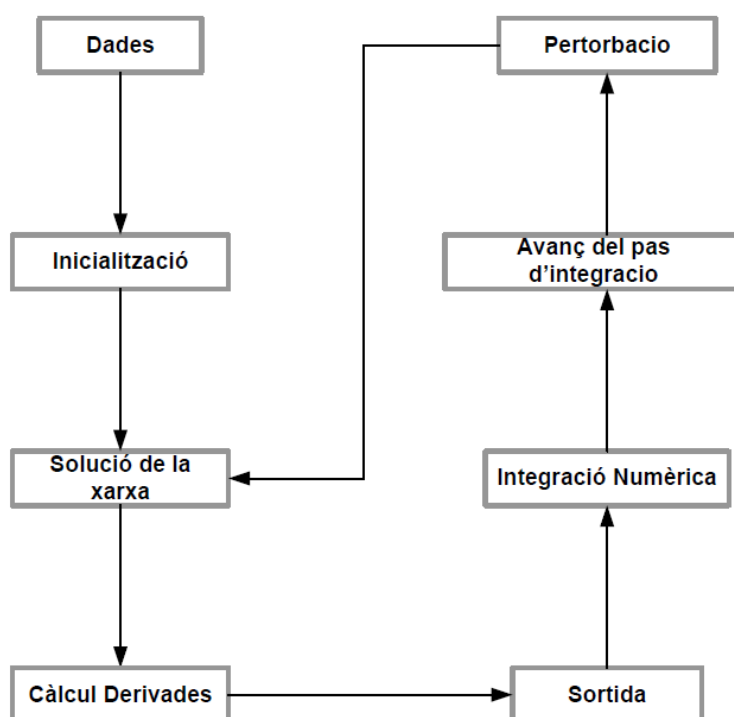


Figura 3.4: Etapes de la simulació dinàmica.

### 3.2.3 Escriptura del model d'usuari

El desenvolupament dels models d'usuari es basa en la descripció del comportament físic o real. Aquest es desenvolupa en llenguatge FORTRAN [10] ja que és el que el PSS<sup>TM</sup>E utilitza. Aquest llenguatge de programació d'alt nivell de propòsit general, procedimental i imperatiu, que està especialment adaptat per al càlcul numèric i científic. S'ha optat per aquest ja que l'altre opció és el Flec, que no presenta cap avantatge ni cap inconvenient.

El model s'estructura en uns modes, on cada un té una finalitat. A la llista següent s'observa cadascun d'aquest modes.

- Mode 1: Inicialitzar totes les variables del model.
- Mode 2: Calcular les derivades dels estats.



- Mode 3: Retornar les sortides, retornar els paràmetres calculats.
- Mode 4: Ha d'actualitzar la variable NINTEG, o sigui, el número màxim d'estats emprats en el model.

A més d'aquests 4 modes, també es disposa d'altres però en aquest Projecte no s'han usat ja que no és necessari. L'estructura del model i la utilització de la versió 32 del PSS<sup>TM</sup>E, no fa necessària l'aparició d'altres modes.





## Capítol 4

# Simulacions

En aquest capítol es fa una demostració del funcionament del cable superconductor enfront a una pertorbació. El que és pretén és validar el funcionament del model dinàmic del cable enfront al que tindria el cable real, el cable físic una vegada és posí en funcionament. Posteriorment és fa una comparació del comportament de la xarxa instal·lant un cable de tecnologia convencional (conductor d'alumini amb aïllament de XLPE) amb el que es té amb un cable superconductor.

### 4.1 Comportament del cable superconductor

En aquest apartat es mostra l'evolució de les diferents variables que influeixen en el comportament del cable. La pertorbació provocada és un curtcircuit al nus número 1 (extrem del cable, on s'alimenta la demanda). Les variables que influeixen en el comportament del cable són, seguint el capítol 2, on s'explica el modelat del cable:

- Intensitat.
- Pèrdues.
- Temperatura.
- Resistència.

La pertorbació provocada per observar el comportament del cable és un curtcircuit al final del cable (nus número 1). La figura 4.1 il·lustra el detall de la xarxa. Aquest curtcircuit és provocat durant 0.5s ja que és el temps màxim que pot actuar ja que per temps superiors les proteccions actuarien [11]. A les figures 4.2, 4.3, 4.4 i 4.5 s'observa el comportament del cable.

D'aquestes figures podem observar que quan es produeix el curtcircuit, a un segon d'iniciar la simulació, augmenten tant la intensitat com la resistència (figures 4.3 i 4.2 respectivament). En règim permanent es té una intensitat de 860A, corresponent a la càrrega de 20MW i 5MVA<sub>r</sub>. La intensitat de curtcircuit pren un valor màxim de 10,5kA. Això provoca que les pèrdues en el conductor també augmentin, assolint un valor màxim de 940kW, o sigui, 940w/m. Aquestes pèrdues provoquen que la temperatura del augmenti de un valor de 77,5K fins a 110K als 0,2s posteriors. El valor de la resistència és distingeixen dues zones diferenciades, funcionant en règim nominal, que presenta una resistència de 0.0003  $\Omega$  (que



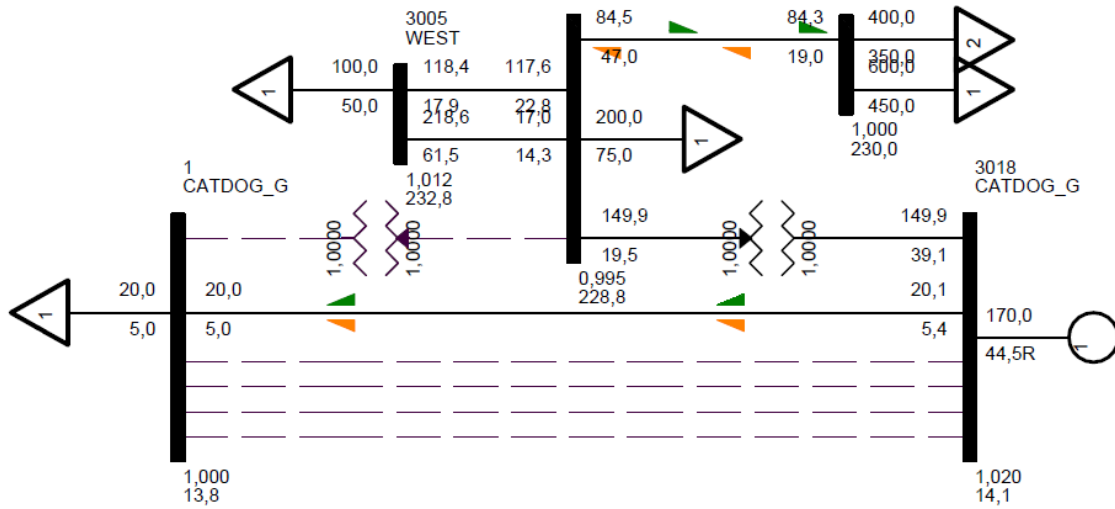


Figura 4.1: Detall de la xarxa utilitzada. Curtcircuit.

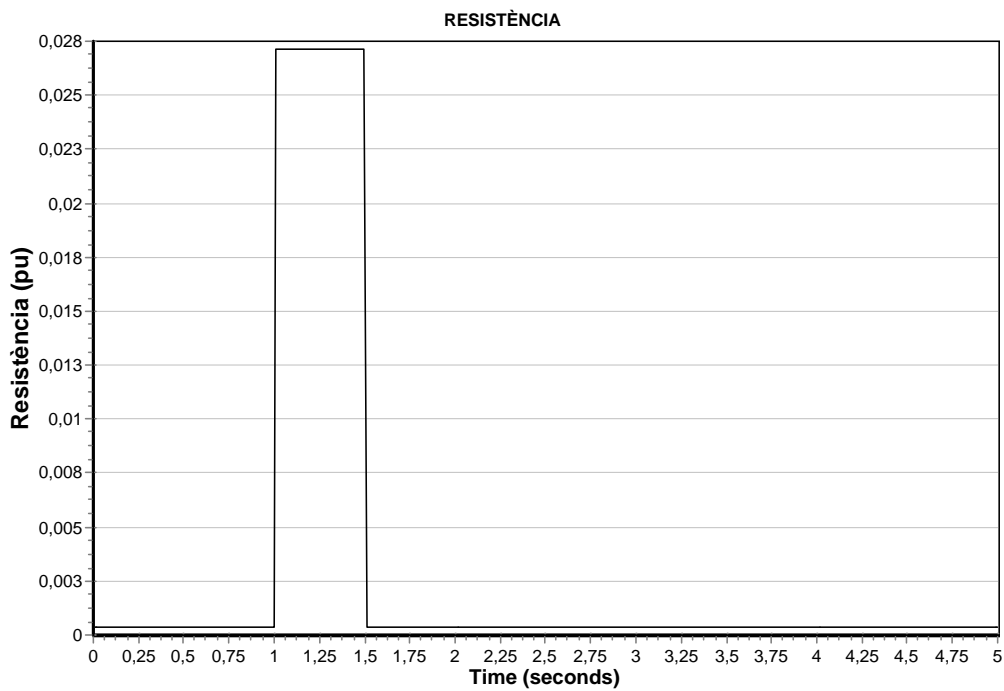


Figura 4.2: Evolució de la resistència.





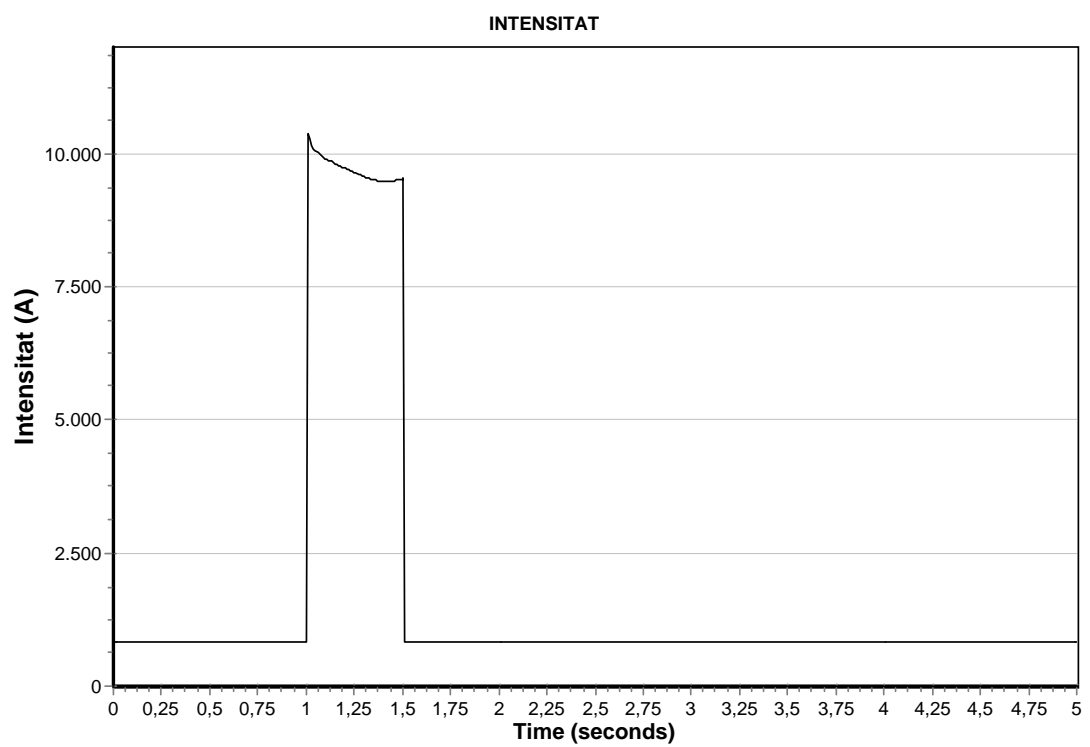


Figura 4.3: Evolució de la intensitat.



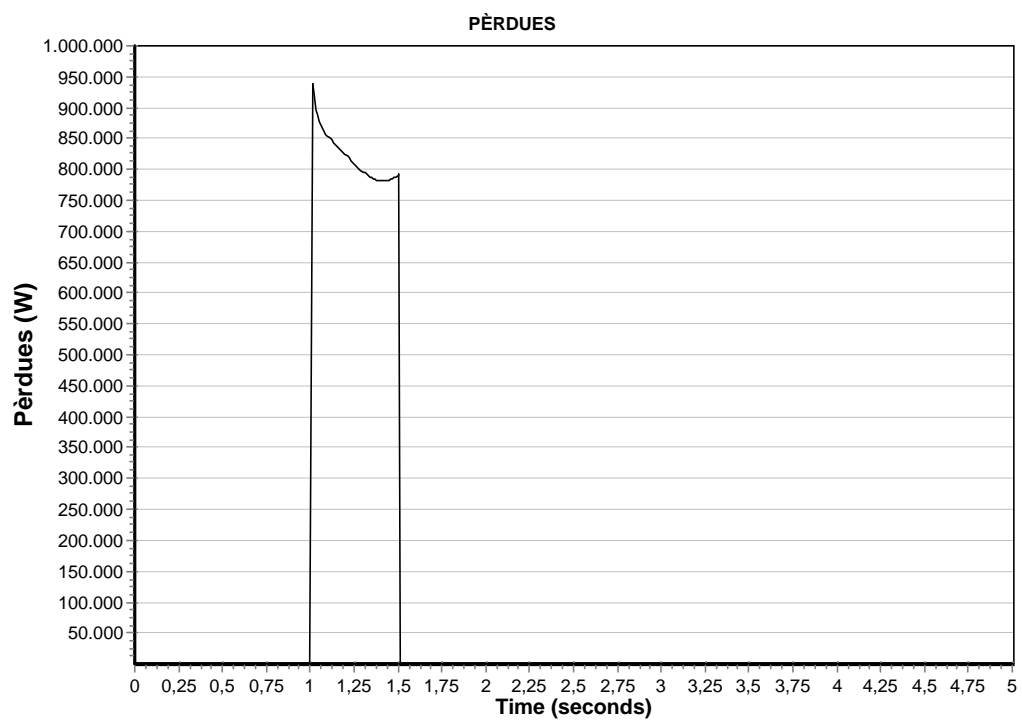


Figura 4.4: Evolució de les pèrdues.



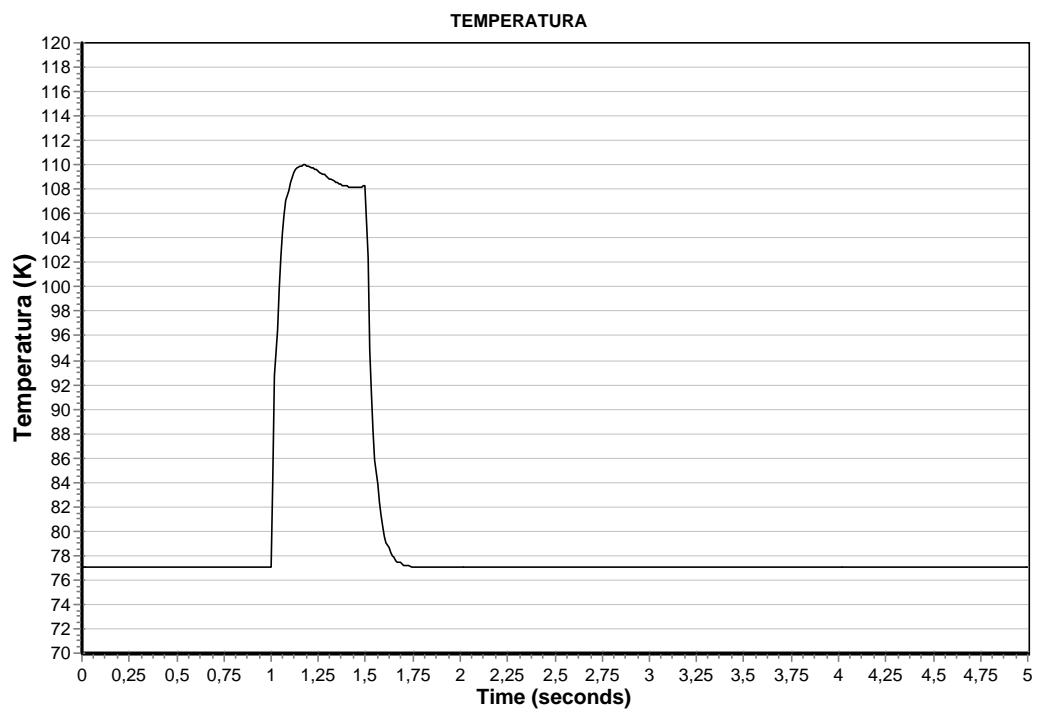


Figura 4.5: Evolució de la temperatura.



correspon al superconductor en règim de superconductivitat) i una altre durant la falta (0.027  $\Omega$ ) que correspon al nucli de coure i de la matriu de plata (durant la falta la resistència de les cintes superconductores és del mateix ordre de magnitud que la del nucli de coure).

Un altre aspecte a senyalar és que la temperatura, figura 4.5 que s'assoleix al superconductor és de 110K. Aquesta temperatura ha de ser inferior a la temperatura d'ebullició del nitrogen sota la pressió del criostat (per tant, es requereix una pressió superior a 12atm per tal que no es produeixi una perforació del dielèctric).

De la gràfica 4.3 és veu que la intensitat màxima de curtcircuit és de 10,5kA. La importància d'aquesta intensitat és que si es limita, també es limiten els esforços mecànics i elèctrics que suporten els elements del sistema elèctric.

## 4.2 Comparació del comportament del sistema elèctric

En aquest apartat es compara el comportament del sistema elèctric instal·lant un cable convencional i el que es té amb un cable superconductor. La pertorbació provocada és la mateixa que a l'apartat anterior 4.1. Al segon d'haver iniciat la simulació, apliquem un curtcircuit de 0,5s al nus 1.

### 4.2.1 Cable convencional

Segons les normes de companyies distribuïdores i els cables oferits per fabricants de s'ha optat per la instal·lació del cable *HERSATENE W.B. RHZ1* del fabricant *General Cable* [12] amb les propietats següents:

Resistència	0.017 $\Omega$ /Km
Inductància	0.094 $\Omega$ /Km
Capacitat	0.374 nF/Km
Intensitat nominal	1040A

### 4.2.2 Anàlisi

A la figura 4.6, 4.7 i 4.8 és compara el funcionament del sistema instal·lant un cable convencional i un superconductor.

En les figures 4.6 i 4.7 és veu un comportament molt diferenciat del sistema. Amb la instal·lació d'un superconductor l'estabilitat del sistema no és veu afectada (ni de tensió ni de freqüència). En canvi si s'instal·la un conductor convencional és perd el sincronisme i l'estabilitat, provocant la pèrdua de mercat.

De la figura 4.6 es veu que la caiguda de tensió durant el sot assoleix un valor de 0,2pu en el cas de haver instal·lat un superconductor i 0,8pu si s'instal·la un cable convencional. En aquest cas el sistema no pot recuperar el règim de funcionament semblant al d'abans de la pertorbació. De la figura 4.7 s'observa la desviació de la freqüència. Aquesta, durant la falta, oscil·la entre els 50Hz i 50,1Hz en el cas del superconductor i entre 50Hz i 50,25Hz en el cas del cable convencional.

En la figura 4.8 es veu la potència consumida per la càrrega. Es comprova que, en el cas de haver instal·lat un superconductor la demanda es veu satisfeta mentre que si s'instal·la un cable convencional no es pot garantir en el subministrament.



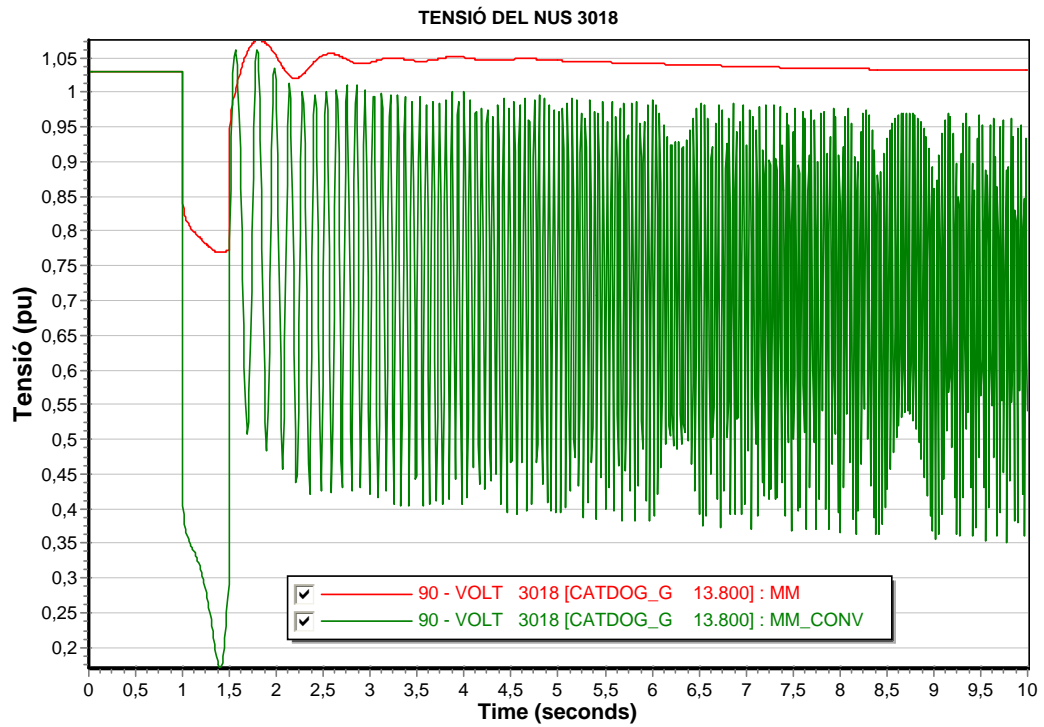


Figura 4.6: Evolució de la tensió.

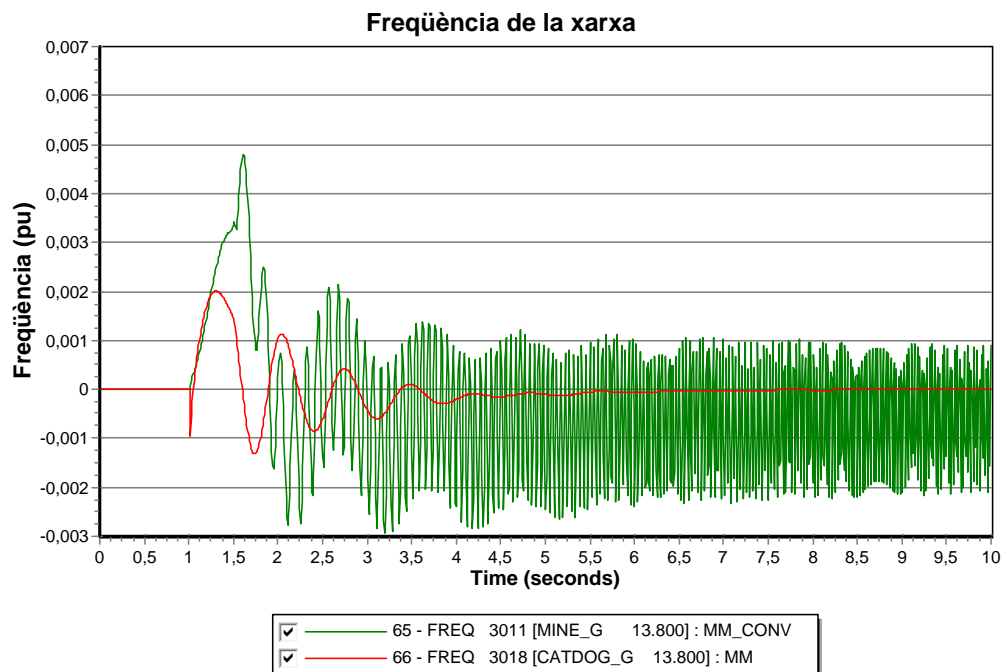


Figura 4.7: Evolució de la desviació de la freqüència.



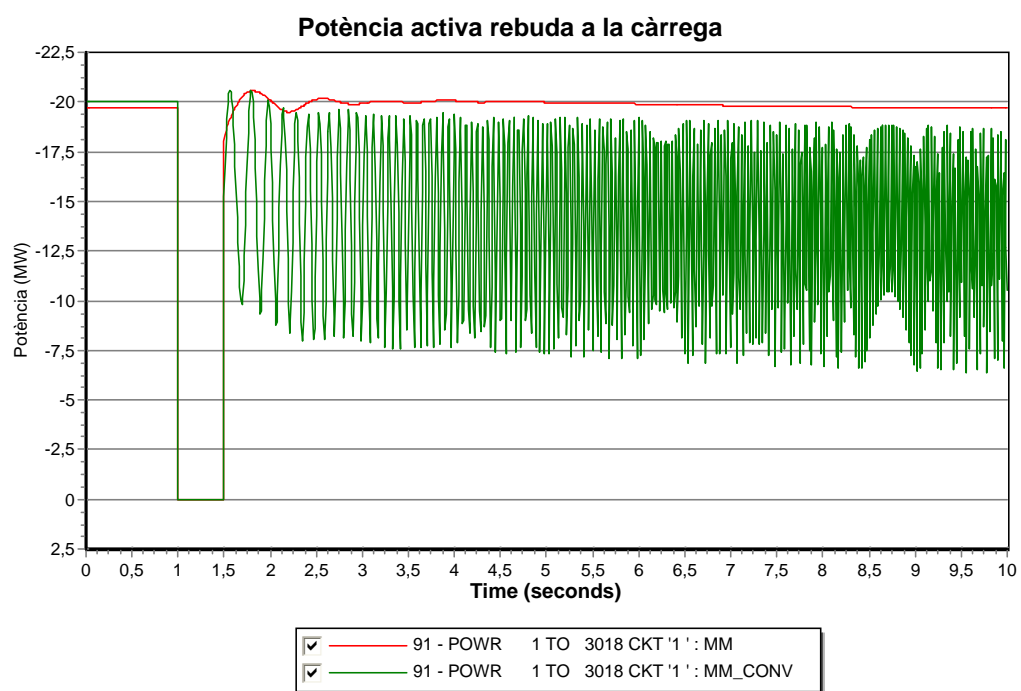


Figura 4.8: Evolució de la potència vista al nus 1.



## Conclusions i treballs futurs

L'objectiu seguit en aquest projecte és el de modelar dinàmicament un cable superconductor per al transport i distribució d'energia elèctrica amb la finalitat de poder realitzar simulacions dinàmiques en sistemes elèctrics on aquests cables siguin presents.

Aquests cables superconductors tenen la característica de que la resistència oferida al pas del corrent varia segons la intensitat que hi circula o per la temperatura del mateix.

Aquest model dinàmic s'ha implementat amb llenguatge FORTRAN. L'objectiu d'aquest codi és identificar un règim de treball per a cada interval de simulació i, a partir d'aquestes dades, calcular el nou règim de funcionament. D'aquesta manera, per cada pas de simulació, és llegeix el valor de la intensitat que circula pel cable, es calculen els paràmetres que ha de tenir el cable per aquestes condicions de funcionament, i és retornen els valors calculats al PSS<sup>TM</sup>E per que pugui seguir la simulació per al pròxim interval de simulació.

Una vegada s'obté el model dinàmic es compara el funcionament del cable utilitzant el nostre model comparant-lo amb un cable de característiques semblants. Els paràmetres geomètrics del cable s'havien obtingut de [13] on es fa un estudi del comportament estàtic i de [14] on es fa un estudi en règim dinàmic. Els resultats obtinguts són:

Taula 4.1: Comparativa del règim d'operació de diferents models superconductors

Paràmetre	Lee	Sohn	MJGSSC
$I_c(A)$	2700	1250	1175
Pèrdues(W/m/fase)	0,7	1	0.3
Temperatura(K)	110	-	110
Temps (s)	0.35	-	0.2

Els aspectes a tenir presents són les reduïdes pèrdues en règim permanent i, en règim dinàmic, l'augment de resistència que ofereix el cable al pas del corrent contribueix a que el sistema no es desestabilitzi. Finalment mencionar que la temperatura màxima del superconductor és el factor limitant a l'hora del disseny del criostat i del sistema de refrigeració ja que la temperatura del superconductor ha de ser sempre inferior a la temperatura d'ebullició del  $LN_2$  ja que si es produeixen bombolles és perforaria el dielèctric amb el següent curtcircuit i la possible destrucció del cable.

Respecte als treballs futurs, una feina a fer alhora de instal·lar cables superconductors és la de definir un nou marc respecte al temps d'actuació de les proteccions, o fins i tot, definir el comportament del dispositiu FCL (*Fault Current Limiter*) basats en el fenomen de la superconductivitat.







# Agraïments

Vull donar les gràcies a tots els companys i amics que han contribuït a portar endavant aquest Projecte Fi de Carrera. De manera particular, m'agradaria nombrar a Dr. Xavier Granados per els consells i suport que m'ha donat. També agrair de manera especial a tots els companys del CITCEA encapçalats pel Director i ponent d'aquest Projecte Fi de Carrera, Dr. Antoni Sudrià i Andreas Sumper, Director del Projecte.

Dels companys del CITCEA, especialment els d'Urgell, vull agrair-lis els consells, ajudes i crítiques constructives que mai s'han negat a oferir-me.

Finalment, dir que sense l'ajuda, suport i paciència de la meva família, aquest Projecte mai hagués pogut ser una realitat.





## Apèndix A

# Resolució de fluxos de càrregues

### A.1 Introducció

El flux de càrregues consta bàsicament de dues etapes; a la primera s'obtenen les tensions (en mòdul i angle) a tots els nusos elèctrics, i a la segona es calculen les magnituds d'interès (fluxos de potència activa i reactiva, pèrdues, etc.). Els mètodes habituals de resolució de la primera etapa del flux de càrregues són:

- Gauss-Seidel.
- Newton-Raphson.
- Desacoblat ràpid.

A continuació es resumeix el mètode de Newton-Raphson, en ser el mètode utilitzat al present Projecte de Fi de Carrera.

### A.2 Formulació del problema

Per formular el problema de flux de càrregues és imprescindible classificar inicialment tots els nusos de la xarxa en un d'aquests tres tipus:

1. Nusos de consum o nusos PQ.
2. Nusos de generació o nusos PV.
3. Nus de referència, oscil·lant o *slack*.

Els nusos de consum o PQ són aquells que tenen un *consum* conegut de potència activa ( $P_{Ci} = P_{Ci}^{\text{esp}}$ ) i reactiva ( $Q_{Ci} = Q_{Ci}^{\text{esp}}$ ), i una *generació* nul·la de potència activa i reactiva ( $P_{Gi} = 0$  i  $Q_{Gi} = 0$ , respectivament).

Els nusos de generació o PV són aquells que tenen un *consum* i una *generació* de potència activa coneguts ( $P_{Ci} = P_{Ci}^{\text{esp}}$  i  $P_{Gi} = P_{Gi}^{\text{esp}}$ , respectivament), i un mòdul de tensió especificat conegut ( $V_i = V_i^{\text{esp}}$ ).



El nus de referència, oscil·lant o *slack* és un únic nus que té un *consum* de potència activa conegut ( $P_{Cn} = P_{Cn}^{\text{esp}}$ ), i a més a més se li assigna l'angle de referència de tensions ( $\theta_n = 0$ ).

Per a una xarxa amb  $n$  nusos, aquests es poden ordenar com:

$$\begin{array}{ll} i = 1, 2, \dots, n_D & \text{essent } n_D \text{ el número de nusos PQ,} \\ i = n_D + 1, n_D + 2, \dots, n_D + n_G & \text{essent } n_G \text{ el número de nusos PV,} \\ i = n & \text{essent } n \text{ l'índex del nus } \textit{slack}, n = n_D + n_G + 1. \end{array}$$

Per altra banda, és necessari conèixer la matriu d'admitàncies de la xarxa passiva, és a dir, la matriu d'admitàncies de les línies i els transformadors de la xarxa. Els elements d'aquesta matriu, anomenada  $Y$ , es calculen com:

$$Y = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \underline{Y}_{(n-1)n} \\ \underline{Y}_{n1} & \cdots & \underline{Y}_{n(n-1)} & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{ll} \underline{Y}_{ii} = \sum \text{Admitàncies de branca connectades al nus } i & \text{(elements de la diagonal de } Y) \\ \underline{Y}_{ij} = -\sum \text{Admitàncies de branques entre els nusos } i \text{ i } j & \text{(elements de fora de la diagonal de } Y) \end{array}$$

La matriu  $Y$  és una matriu  $n \times n$  complexa. Per conveniència, convé notar-la com a suma de dues matrius que contenen respectivament la part real i imaginària dels seus elements:

$$Y = G + jB = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & G_{(n-1)n} \\ G_{n1} & \cdots & G_{n(n-1)} & G_{nn} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & B_{(n-1)n} \\ B_{n1} & \cdots & B_{n(n-1)} & B_{nn} \end{bmatrix}$$

El flux de càrregues és un problema no lineal que es formula a partir de les dades conegudes de potència neta injectada a cada nus de la xarxa:

$$\begin{array}{ll} P_i^{\text{esp}} = P_{Gi}^{\text{esp}} - P_{Ci}^{\text{esp}} & i = 1, 2, \dots, n_D + n_G \\ Q_i^{\text{esp}} = Q_{Gi}^{\text{esp}} - Q_{Ci}^{\text{esp}} & i = 1, 2, \dots, n_D \end{array}$$

I les equacions que intervenen al problema de flux de càrregues són [15]:

$$\begin{array}{ll} P_i^{\text{esp}} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n_D + n_G \\ Q_i^{\text{esp}} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n_D \end{array}$$

$P_i^{\text{esp}}$  és la potència *activa* neta injectada al nus  $i$ ,



$Q_i^{\text{esp}}$  és la potència *reactiva* neta injectada al nus  $i$ ,

$V_i$  és el mòdul de la tensió del nus  $i$ ,

$V_j$  és el mòdul de la tensió del nus  $j$ ,

$G_{ij}$  és l'element de la fila  $i$ , columna  $j$ , de  $G$ ,

$B_{ij}$  és l'element de la fila  $i$ , columna  $j$ , de  $B$ .

La solució d'aquest problema consisteix a trobar els desfasaments  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_D + n_G$ , i els mòduls de tensions  $V_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_D$ , que satisfan les  $2n_D + n_G$  equacions anteriors.

### A.3 Mètode de Newton-Raphson

Aquest mètode iteratiu obté successivament nous valors mitjançant aproximacions de primer ordre de les funcions no lineals involucrades. En primer lloc, per a cada nus  $i$  es defineix el residu o diferència entre la potència especificada i la potència calculada a cada iteració:

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= P_i^{\text{esp}} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ i &= 1, 2, \dots, n_D + n_G \\ \Delta Q_i &= Q_i^{\text{esp}} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ i &= 1, 2, \dots, n_D\end{aligned}$$

A partir d'aquest punt, les equacions del mètode Newton-Raphson es mostren en forma matricial per simplicitat de notació. Es parteix de l'estimació inicial de desfasaments i tensions,  $[\theta | V]^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_D+n_G} | V_1, V_2, \dots, V_{n_D}]^T$ . A cada iteració  $k$  s'obtenen correccions  $[\Delta\theta | \Delta V/V]^T$  resolent el sistema *lineal*:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k$$

i nous valors  $[\theta | V]^T$  de:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k$$

essent  $H$ ,  $N$ ,  $M$  i  $L$  sub-matrius amb els respectius termes calculats com:

$$\left. \begin{aligned} H_{ij} &= L_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ N_{ij} &= -M_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \right\} \text{elements de fora de les diagonals,}$$



$$\left. \begin{aligned} H_{ii} &= -Q_i - B_{ii}V_i^2 \\ L_{ii} &= Q_i - B_{ii}V_i^2 \\ N_{ii} &= P_i + G_{ii}V_i^2 \\ M_{ii} &= P_i - G_{ii}V_i^2 \end{aligned} \right\} \text{elements de les diagonals.}$$

El procés iteratiu s'atura quan es compleix que:

$$\max (|\Delta P_1^k|, \dots, |\Delta P_{n-1}^k|, |\Delta Q_1^k|, \dots, |\Delta Q_{n_D}^k|) \leq \varepsilon$$

per a una  $\varepsilon$  suficientment petita. Per a valors de  $[\theta |V]^T$  propers a la solució, el mètode de Newton-Raphson convergeix quadràticament. En el cas concret del flux de càrregues, independentment de la mida de la xarxa, el número d'iteracions oscil·la habitualment entre 3 i 5 quan es parteix de  $\theta_i^0 = 0$  a tots els nusos i  $V_i^0 = 1$  p.u. a tots els nusos PQ.

La ràpida convergència d'aquest mètode és el principal avantatge respecte al mètode de Gauss-Seidel, el qual té convergència lineal. Per altra banda, el mètode desacoblat ràpid és una variant del mètode Newton-Raphson, i sol ser d'utilitat en xarxes grans i en aplicacions de "temps real", les quals requereixen rapidesa en comptes de precisió.



## Apèndix B

# Paràmetres geomètrics del cable

Els paràmetres geomètrics del cable s'han obtingut majoritàriament de [14] i [13]. A la taula B s'observen els paràmetres geomètrics. A la taula B desglossa altres paràmetres que intervenen en el comportament del cable. També s'han obtingut paràmetres de: [16], [17], [8] i [7]

Taula B.1: Paràmetres geomètrics del cable

Component del cable	Valor	Descripció
Longitud	1000m	Longitud del cable
Diàmetre nucli	16mm	Coure trenat
Cintes superconductores	0.24mm x 3.8mm	Bi-2223 4 capes amb 52 cintes
Conductor	20mm	Diàmetre exterior del conjunt de cintes
Dielèctric	7mm	Gruix PPLP impregnat de $LN_2$
Diàmetre del camp	37mm	Diàmetre de la pantalla
Aïllament tèrmic	95mm/129mm	Dos cilindres coaxials d'acer corrugat
Diàmetre extern	136mm	Recobriments de PVC

Taula B.2: Paràmetres tèrmics i físics dels cable

Components tèrmics	Valor	Descripció
$C_p LN_2$	2,03 J/K g	Calor específic $LN_2$
$\rho LN_2$	0.804 Kg/m <sup>3</sup>	Densitat $LN_2$
$\epsilon_0$	2,21	Constant Dielèctrica (PPLP impregnat $LN_2$ )
$H_{conv}$	300 W/m <sup>2</sup> k	Coefficient convecció, en règim turbulent, entre cinta i $LN_2$
$C_p Ag$	232 J/K g	Calor específic de la plata
$\rho_c$	7.45E-11 $\Omega$ m	Resistivitat crítica dels filaments
Temperatura Crítica	90K	Temperatura crítica dels filaments $Bi - 2223$
Intensitat Crítica	1175A	Intensitat crítica dels filaments $Bi - 2223$
Resistivitat Ag	2,70E-09 $\Omega$ m	
Resistivitat Cu	1,70E-08 $\Omega$ m	







## Apèndix C

# Sistema Per Unitat

La major part de càlculs referent a sistemes elèctrics es realitza en quantitats expressades en tant per u (pu). Aquesta és el resultat de dividir un valor físic, expressada en les unitats pertinents, per un valor base, expressada en les mateixes unitats.

$$Valor (pu) = \frac{Valor Real}{Valor base} \quad (C.1)$$

Aquest sistema va ser introduït per facilitar els càlculs ja que totes les variables apareixen en valors petits i semblants a més de facilitar la lectura dels resultats (especialment en sistemes on hi hagi més d'un nivell de tensió). La primera premissa ja no té vigència però la segona és prou vàlida per justificar l'ús d'aquest sistema.

El programari utilitzat en aquest projecte utilitza valors trifàsics simètrics i equilibrats. Aquesta característica condiona les variables de la base a escollir. Les variables a seleccionar que formen part de la base són:

- Potència ( $S_b$ ).
- Tensió ( $V_b$ ).
- Intensitat ( $I_b$ ).
- Impedància ( $Z_b$ ).

Per definir el valor de la potència que intervé al PSS<sup>TM</sup>E és fa quan es defineix la xarxa. Per defecte es pren 100MVA. En canvi la tensió varia segons el nus.

Amb aquests dos valors no és suficient per obtenir tots els paràmetres que formen la base. Mitjançant aquests valors s'obtenen les relacions següents referent a la impedància i la intensitat.

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \quad (C.2)$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (C.3)$$

Es recorda que la admitància base ( $Y_b$ ) es pren com a l'inversa de la impedància base.





## Apèndix D

# Pressupost

### D.1 Introducció

Aquest projecte de modelització és un projecte d'oficina, on no s'ha realitzat cap muntatge ni s'ha construït cap component del cable. Per tant, l'únic material que s'ha usat és el d'oficina.

A continuació es presenta el pressupost desglossat en les diferents partides, agrupades per activitats: hardware, software i mà d'obra. Els preus no reflecteixen l'IVA. El pressupost té validesa per un mes a partir de la data i signatura.

### D.2 Pressupost del hardware

La taula [D.1](#) mostra el total destinat al hardware.

Taula D.1: Pressupost del hardware

Concepte	Preu/unitat	Unitats	Total
Ordinador Dell XPS Studio 8100	699 €	1	699 €
Monitor Siemens	96 €	1	96 €
<b>TOTAL</b>			<b>795 €</b>

### D.3 Pressupost del software

La taula [D.2](#) mostra les quantitats destinades al software.

Taula D.2: Pressupost del software.

Concepte	Preu	Unitats	Total
<i>PSS<sup>TM</sup>E</i>	2000 €	1	2000 €
<b>TOTAL</b>			<b>2000 €</b>



## D.4 Pressupost de mà d'obra

La taula D.3 desglossa el pressupost destinat a treballs d'enginyeria.

Taula D.3: Pressupost de la mà d'obra.

Concepte	Preu per hora	Núm. d'hores	Total
Diseny	20 €/h	140	2800 €
Programació	20 €/h	240	4800 €
Redacció	20 €/h	160	3200 €
<b>TOTAL</b>		<b>540</b>	<b>10800 €</b>

## D.5 Pressupost total

La taula D.4 mostra el cost total del projecte

Taula D.4: Suma total del pressupost.

Capítol	Preu
Pressupost del hardware	795 €
Pressupost del software	2000 €
Pressupost de la mà d'obra	10800 €
TOTAL (sense IVA)	13595 €
IVA (16%)	2175,20 €
<b>TOTAL</b>	<b>15770,20 €</b>

**Data:** 2 de Març de 2010  
**Signatura:** Miquel Jeroni Gelabert Serra



## Apèndix E

# Impacte ambiental

El present Projecte de Fi de Carrera és un projecte d'innovació de l'àrea dels cables superconductors aplicats el transport o distribució d'energia elèctrica. Totes les activitats que intervenen al projecte es consideren tasques d'oficina, les quals generen un impacte ambiental d'abast menyspreable al seu entorn.

El material emprat és:

- Paper i material d'oficina.
- Energia Elèctrica.

Des de el punt de vista de la construcció i explotació d'aquestes instal·lacions s'ha de fer esment a:

- Eliminació línies aèries amb una reducció de l'impacte visual que provoca.
- Menors pèrdues, amb la consegüent reducció de combustible.
- Utilització d'un dielèctric neutre (el 78% de l'atmosfera està composta per nitrogen).
- Supressió de EMI's ja que el camp està confinat a l'interior de la pantalla.
- Aprofitament de galeries existents, cosa que provoca que l'obra civil a realitzar seria relativament petita.
- Capacitat de treure de zones urbanes instal·lacions elèctriques com subestacions i centres de distribució i distribució.





## Bibliografia

- [1] <http://www.amsc.com/>. 5, 14, 23, 25
- [2] C. P. Poole [et al.]. *Superconductivity*. Academic Press Title, 2nd edition, 2007. 7, 18
- [3] Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Secretaría General de Energía. Subdirección General de Planificación Energética. Planificación de los sectores de electricidad y gas 2007-2016. Desarrollo de las redes de transporte. *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio*, Maig 2008 [<http://www.mityc.es/NR/rdonlyres/69C43BE5-9613-49AD-B29C-0D69743771D2/0/Planificacion.20082016.pdf>]. 13
- [4] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw Hill, 1994. 13
- [5] J. Howe [et al.]. Very Low Impedance (VLI) superconductor cables: concepts, operational implications and financial benefits. A White Paper. Technical report, American Superconductor Corporation, Nexans, Oak Ridge National Laboratory, Sumitomo Electric Industries and Ultera, Novembre 2003. 28
- [6] T. Takahashi [et al.]. Dielectric Properties of 500 m Long HTS Power Cable. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15:1767–1770, Juny 2005. 29
- [7] G. Vellego and P. Metra. An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes. *Supercond. Sci. Technol.*, 1995. 29, 55
- [8] V. Akhmatov. *Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003. 30, 55
- [9] Gerard del Rosario. Estudi de l'impacte dels cables superconductors de molt baixa impedància a la xarxa elèctrica. Master's thesis. 33
- [10] Stephen J. Chapman. *Fortran 90/95 for Scientists and Engineers*. WCB/McGraw Hill, 1998. 36
- [11] L. Rostila [et al.]. Fault current model for YBCO cables. *Superconductor Science and Technology*, 19(8):756–761, Agost 2006. 39
- [12] General Cable. Catálogo de productos. 44
- [13] G.J. Lee [et al.]. The Feasibility Study of High Temperature Superconducting Cable for Congestion Relaxation Regarding Quench effect. *IEEE*, 2005. 47, 55
- [14] S.H. Sohn [et al.]. Verification test of 22.9 kV underground HTS cable. *Physica C*, 463–465:1146–1149, 2007. 47, 55
- [15] A. Gómez Expósito [et al.]. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw Hill, 2002. 52



- [16] F. P. Incropera i D. P. DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall, 1999. [55](#)
- [17] M. Däumling [et al.]. Ac loss in superconducting power cables. In A. Narlikar, editor, *Studies of High Temperature Superconductors*, volume 33, page 73. Nova Science Publishers, 2000. [55](#)

