

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Implementació d'un banc de proves d'inversors multinivell per aplicacions de vehicles elèctrics

MEMÒRIA

Autor:

Adrià Luque Acera

Directors:

Sergio Busquets Monge, Àlber Filbà Martínez

Convocatòria:

Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En el present Treball de Fi de Grau s'explica el procés per implementar un banc de proves d'un convertidor de potència contínua-alterna multinivell, concretament de la topologia *Extended Multilevel Active Clamped*.

A l'inici del treball es disposava del prototip del convertidor ja dissenyat i construït, i de la modulació, aspectes que no formen part del present treball però sí del projecte d'investigació en el que s'emmarca, dut a terme pel Grup de Recerca en Electrònica de Potència a l'ETSEIB. El treball realitzat, doncs, comença a partir d'aquest punt i consisteix en diverses tasques dutes a terme per deixar el banc de proves operatiu, així com, posteriorment, la realització d'un seguit de proves representatives per obtenir les dades necessàries per comprovar el funcionament i les possibles millores del control proposat pel GREP. Aquestes tasques es poden dividir en tres grans grups, dels que se'n deriven els objectius del treball, i per tant, també la seva estructura.

El primer objectiu és aconseguir la captura automatitzada de les dades de tots els dispositius de mesura del sistema, com l'oscil·loscopi, els sensors i la càmera tèrmica. Aquest és el primer gran apartat d'aquest document, que explica pas a pas el procediment dut a terme per aconseguir un seguit de programes per capturar les dades necessàries de forma automàtica i còmoda.

El segon objectiu és donar suport al GREP en la preparació dels diferents elements del banc de proves i en la conducció final de les proves representatives. En aquest document es divideixen aquestes dues parts, primer exposant les modificacions i addicions fetes al sistema per deixar-lo operatiu, i després descrivint les diferents proves i com es van dur a terme.

Finalment, el tercer objectiu és processar les dades obtingudes a les proves de forma que es puguin veure els resultats de forma gràfica d'una manera ràpida i còmoda al final de cada prova, per saber si hi ha hagut algun error o poder comparar resultats immediatament. Per aconseguir-ho s'ha elaborat un programa de *Matlab* que genera els gràfics d'interès a partir dels arxius de dades de forma automàtica, i també els desa per posteriors visualitzacions.

Al finalitzar aquest treball tots tres objectius s'han assolit completament, la captura de dades funciona i és còmoda i permet certa interacció amb l'usuari, el banc de proves es va deixar operatiu, les proves (tret d'alguns errors puntuals) han sigut un èxit, demostrant l'efectivitat del control emprat i de les tasques dutes a terme, i els resultats es poden veure ràpidament gràcies als programes de processat, que també permeten la comparació ràpida entre proves.

Taula de continguts

Resum.....	1
Glossari.....	5
1. Introducció.....	7
1.1. Objectius.....	7
1.2. Abast.....	7
2. Sistema.....	9
2.1. El convertidor.....	9
2.2. Banc de proves.....	15
3. Automatització de la captura de mesures.....	19
3.1. Captura de l'oscil·loscopi.....	19
3.1.1. Estructura bàsica i primer programa.....	19
3.1.2. Interfície gràfica.....	22
3.1.3. Sincronització i millores finals.....	28
3.2. Captura al <i>ControlDesk</i>	31
3.2.1. Funcionament bàsic del <i>ControlDesk</i>	31
3.2.2. Projecte existent i primers canvis.....	33
3.2.3. Modificacions finals per la captura de dades.....	35
3.3. Captura d'imatge tèrmica.....	39
4. Tasques de suport.....	43
4.1. Preparació del banc de proves.....	43
4.1.1. Preparació dels cables de senyal.....	43
4.1.2. Reparacions i correcció dels llaços de massa.....	46
4.1.3. Elaboració dels cables d'alimentació.....	49
4.1.4. Addició d'elements a les plaques.....	50
4.1.5. Inserció de filtres.....	50
4.1.6. Connexió d'un interruptor general.....	51
4.1.7. Distribució de l'espai.....	52
4.1.8. Substitució dels cables dels sensors.....	54
4.2. Conducció de les proves.....	55
4.2.1. Proves prèvies amb fonts de CC independents.....	55
4.2.2. Proves inicials amb bateries.....	56
4.2.3. Calibratge i càrrega.....	58
4.2.4. Proves definitives segons els casos de l'article.....	61
4.2.5. Planificació de les proves.....	62

5.	Processat de dades	65
6.	Resultats experimentals.....	71
6.1.	Taula de resultats globals	71
6.2.	Representació gràfica dels resultats	74
6.2.1.	Cas 1	74
6.2.2.	Cas 2	79
6.2.3.	Cas 3	81
6.2.4.	Efectes del soroll	82
6.2.5.	Efectes de la Temperatura	84
6.3.	Comparació amb les simulacions.....	86
7.	Pressupost.....	87
8.	Impacte ambiental.....	89
	Conclusions	91
	Agraïments.....	93
	Bibliografia	95
	Referències bibliogràfiques.....	95
	Bibliografia complementària.....	96

ANNEXOS

(Document addicional amb numeració independent)

- A. Imatges dels components del sistema
- B. Codis dels programes
 - B.1. Programa de captura de dades de l'oscil·loscopi
 - B.2. Programa de processat de dades
 - B.3. Programa per comparar resultats
- C. Resultats gràfics de les proves
 - C.1. Cas 1
 - C.2. Cas 2
 - C.3. Cas 3

Glossari

A continuació es presenta una llista de les sigles emprades en aquest document. Les més importants i poc comunes es detallen durant l'explicació, però d'altres s'han obviat.

AGND	→	<i>"Analog Ground"</i> , una connexió a terra comuna pels sensors de contínua connectats en mode diferencial
BMS	→	<i>"Battery Management System"</i> , sistema que controla la càrrega de les bateries i les desconnecta quan es troben fora del rang de seguretat
BNC	→	(Connector) <i>"Bayonet Neill-Concelman"</i> , un tipus de connector usat per cables coaxials, per exemple els dels sensors
CA	→	Corrent Altern (equivalent a AC, <i>"Alternating Current"</i>)
CC	→	Corrent Continu (equivalent a DC, <i>"Direct Current"</i>)
CLK	→	<i>"Clock"</i> , senyal de rellotge que sincronitza diferents components
DB	→	(Connector) <i>"D-subminiature"</i> , usat per connectar equips elèctrics. El nombre que l'acompanya indica el número de pins del connector
DEEL	→	Departament d'Enginyeria Electrònica
ECTS	→	<i>"European Credit Transaction and Accumulation System"</i> , sistema de crèdits usats per les universitats Europees
EMAC	→	<i>"Extended Multilevel Active Clamped"</i> , una topologia de convertidors NPC
ETSEIB	→	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
FPS	→	Fotogrames Per Segon, o <i>"Frames Per Second"</i>
GND	→	<i>"Ground"</i> , terra o referència elèctrica
GREP	→	Grup de Recerca en Electrònica de Potència
iB, iBav	→	Corrent de les bateries i corrent <i>"average"</i> després del filtrat
IDC	→	(Connector) <i>"Insulation Displacement Contact"</i> , usat per connectar cables plans amb diferents conductors aïllats a dins, usant unes pinces afilades per travessar l'aïllant correcte en cada cas
IGBT	→	<i>"Insulated-Gate Bipolar Transistor"</i> , un tipus de transistor
IGCT	→	<i>"Insulated Gate-Commutated Thyristor"</i> , un tipus de tiristor
IR	→	<i>"Infrared Radiation"</i> , Radiació Infraroja
LED	→	<i>"Light Emitting Diode"</i> , díode emissor de llum
MAC	→	<i>"Multilevel Active Clamped"</i> , una topologia de convertidors NPC
MOSFET	→	<i>"Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor"</i> , un tipus de transistor
NPC	→	<i>"Neutral Point Clamped"</i> , una família dels convertidors multinivell

PCB	→ <i>“Printed Circuit Board”</i> , placa de circuit imprès
RGB	→ <i>“Red-Green-Blue”</i> , model additiu per representar colors
RL	→ (Càrrega) Resistiva-Inductiva
RoHS	→ <i>“Reduction of Hazardous Substances”</i> , normativa de la Unió Europea
SAI	→ Sistema d’Alimentació Ininterrompuda (equivalent a UPS, <i>“Uninterruptible Power Supply”</i>), sistema que proveeix alimentació d’emergència en cas de fallada de la xarxa
SOC	→ <i>“State Of Charge”</i> , estat de càrrega de les bateries
SPDT, SPMT, SPST	→ Interruptors classificats pel nombre de canals que connecten. Del més senzill al més complex: <i>“Single-Pole Single-Throw [switch]”</i> , interruptor d’un pol i una via <i>“Single-Pole Double Throw [switch]”</i> , interruptor d’un pol i dues vies, o commutador simple <i>“Single-Pole Multiple Throw [switch]”</i> , interruptor d’un pol i múltiples vies, nom genèric normalment usat per més de dues vies
TCP/IP	→ <i>“Transmission Control Protocol / Internet Protocol”</i> , model de protocols en les comunicacions via internet i xarxes similars
UPC	→ Universitat Politècnica de Catalunya
USB	→ <i>“Universal Serial Bus”</i> , estàndard industrial per designar cables, connectors i protocols per connectar ordinadors amb els seus perifèrics
vB	→ Voltatge de les bateries
VISA	→ <i>“Visual Instrument Software Architecture”</i> , forma de comunicació entre ordinadors i dispositius estesa en el camp de les proves i mesures

1. Introducció

El present treball s'emmarca dins d'un projecte d'investigació dut a terme pel GREP (Grup de Recerca en Electrònica de Potència) dins del Departament d'Enginyeria Electrònica (DEEL) de l'ETSEIB, UPC. La investigació del GREP en la que s'ha col·laborat es centra en l'aplicació dels convertidors electrònics de potència, concretament els convertidors multinivell de contínua-alterna, per l'aplicació en vehicles elèctrics i el major aprofitament de l'energia emmagatzemada a les bateries destinada a alimentar el motor.

Aquest treball es centra en la implementació d'un banc de proves experimentals per comprovar l'efectivitat d'un prototip i un control determinats elaborats prèviament pel GREP, ajudant en aspectes com l'automatització de la captura de dades o l'elaboració de components nous pel sistema necessaris per realitzar les proves, per finalment dur a terme aquestes proves experimentals, processar les dades, i comprovar els resultats.

1.1. Objectius

Aquest treball té tres vessants clarament diferenciades, i per tant de cada una se'n pot derivar un objectiu principal:

- Aconseguir una captura automatitzada de les dades, tant de les mesures dels sensors com de l'oscil·loscopi i la càmera tèrmica presents en el sistema.
- Donar suport als experiments, col·laborant amb el GREP en el que faci falta, des de la preparació de components del banc de proves per deixar-lo operatiu fins la supervisió de les pròpies proves en els casos representatius indicats.
- Processar les dades obtingudes en els experiments de forma que quedin patents resultats i diferències entre els diferents casos i controls estudiats.

1.2. Abast

Aquest treball s'inclou dins d'un projecte de recerca molt més ampli, però està molt més limitat. A l'inici es disposa del prototip del convertidor i del seu control ja programat, però sense haver-se provat prèviament.

L'abast d'aquest projecte conté l'enteniment del sistema del banc de proves, la programació de la captura automatitzada, l'elaboració de nous components pel sistema, la supervisió de les proves i el processat de les dades, però en cap cas el control ni el disseny del convertidor, que formen part de la recerca del GREP però no d'aquest treball.

2. Sistema

Un cop introduït el treball en aquest capítol es descriurà el sistema utilitzat, que consisteix en un banc de proves del convertidor multinivell estudiat, dins del laboratori del Grup de Recerca en Electrònica de Potència a la planta 9 de l'ETSEIB. Aquest sistema està format per diversos elements, però entre ells el més important és sens dubte el convertidor. Per això es començarà parlant d'aquest element en particular i més en detall, per després veure el banc de proves sencer.

2.1. El convertidor

El convertidor emprat per aquest treball és un convertidor de contínua-alterna, que transfereix l'energia d'un sistema de corrent continu a un de corrent altern. Aquests sistemes podrien ser tant fonts com càrregues, i el convertidor podria fer passar el flux en un sentit o l'altre, però en el cas d'estudi el sistema de contínua és un grup de bateries (font) i el d'alterna és una càrrega trifàsica (càrrega). Es considera, per tant, que el flux de potència és positiu si passa del sistema de contínua al d'alterna. A la Figura 2.1 es pot veure l'esquema més simple d'un sistema de conversió de potència, i entre parèntesis el cas dels sistemes del banc de proves.

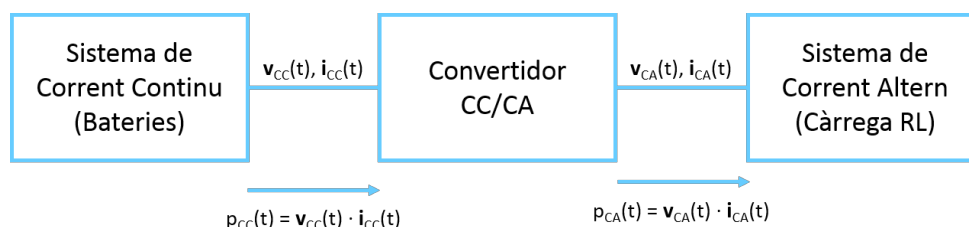


Figura 2.1 – Esquema general d'un sistema de conversió CC-CA

És important tenir en compte que el convertidor es relaciona amb els sistemes connectats forçant una sola magnitud amb cada sistema, ja sigui tensió o corrent, i és el sistema qui força la magnitud contrària.

Els convertidors convencionals amb sistemes font que imposen tensió es construeixen a partir d'un mateix bloc, l'interruptor d'un pol i doble via (SPDT, "Single-Pole Double-Throw") o commutador, que permet la connexió d'un terminal d'alterna a un d'entre dos terminals de contínua, i només a un a la vegada. El bloc rep com a entrades la tensió v_{CC} i el corrent i_{CA} , i força com a sortides la tensió v_{CA} i els corrents i_{CC1} , i_{CC2} .

A la Figura 2.2 es pot veure primer una implementació del SPDT amb dispositius semiconductors com són els díodes i els interruptors controlats (que poden ser tant MOSFETs com IGBTs o IGCTs), que compona el que s'anomena mig pont, i també un possible símbol d'aquest bloc (on el cercle negre indica a quin terminal de contínua es connecta el terminal d'alterna). De fet, cada SPDT està format per dos interruptors d'un pol i una via (SPST, "Single-Pole Single-Throw") unidireccionals en tensió i bidireccionals en corrent en sèrie, cada un format per un interruptor controlat i un díode en antiparal·lel. La tensió del costat d'alterna, doncs, serà una ona binària oscil·lant entre els dos nivells de contínua depenent del control, que es correspon a un component principal sinusoidal amb distorsió.

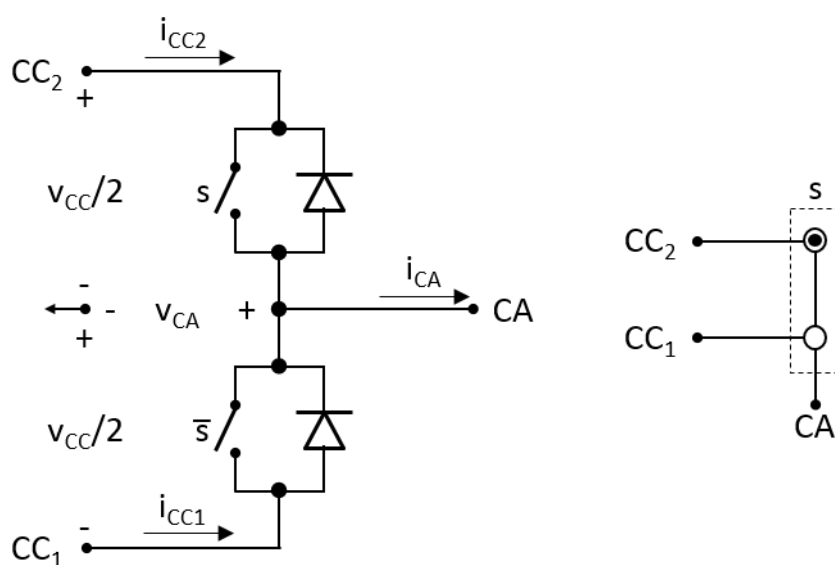


Figura 2.2 – Estructura d'un SPDT amb mig pont de dos nivells (esquerra), i símbol (dreta)

Els interruptors han d'estar controlats amb un senyal binari de control s de forma que només un estigui tancat en un mateix instant, per tant, en una estructura de mig pont, els interruptors han de controlar-se pel mateix senyal de forma complementària, quan un està tancat, l'altre ha d'estar obert, i viceversa.

Els díodes en antiparal·lel serveixen per garantir la bidireccionalitat del corrent en cas d'utilitzar interruptors unidireccionals (IGBT), i també per proporcionar un camí pel corrent altern en el petit temps en el que els dos interruptors romanen oberts. Aquest temps ("blanking time") és necessari degut als possibles retards en l'execució de les ordres dels senyals de control, i si no s'introdueix es correria el risc que abans que un interruptor s'obris, l'altre es tanqués, provocant un curtcircuit. Amb aquesta solució sempre hi ha un temps de seguretat entre que s'obre un interruptor i es tanca el següent.

Aquest seria el cas més simple d'un convertidor monofàsic de dos nivells, però el convertidor del banc de proves no és així. Es tracta d'un convertidor multinivell, és a dir, que consta de més terminals a la part de contínua. A partir del símbol presentat, es poden ampliar els terminals de contínua fins a un cas general amb n nivells, i obtenir l'interruptor d'un pol i múltiples vies o SPMT ("Single-Pole Multiple-Throw") que es pot veure a l'esquerra de la Figura 2.3. A més, el convertidor consta de múltiples fases a la part d'alterna, i per tant s'han d'afegir diferents branques d'interruptors, ampliant així el símbol i arribant al cas general d'un convertidor de n nivells i z fases amb el símbol que es pot veure a la dreta de la mateixa Figura.

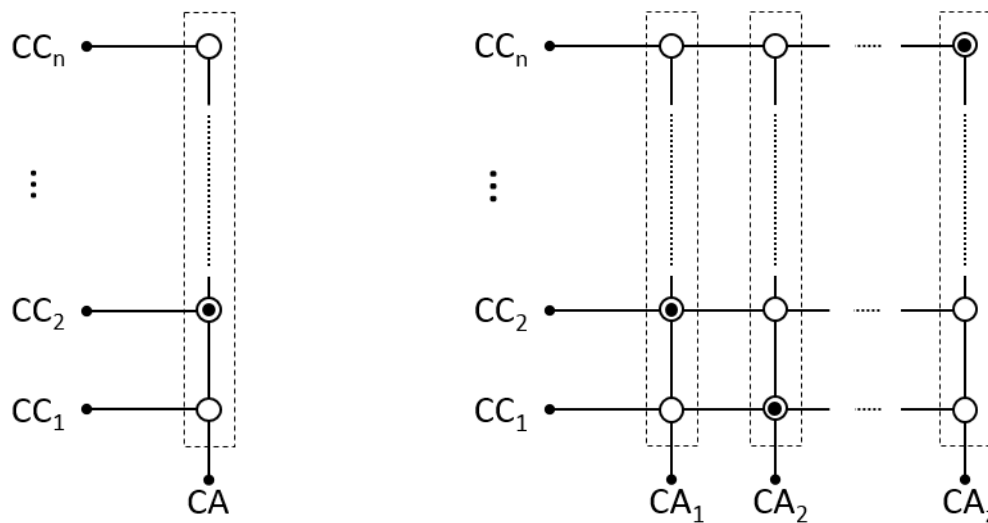


Figura 2.3 – Símbol d'un interruptor SPMT (esquerra) i d'un convertidor de n nivells i z fases (dreta)

Per concretar, el convertidor que s'ha usat en aquest treball és un convertidor trifàsic de quatre nivells, per tant el seu símbol concret és el de la Figura 2.4, amb quatre punts de contínua i tres branques, una per fase d'alterna.

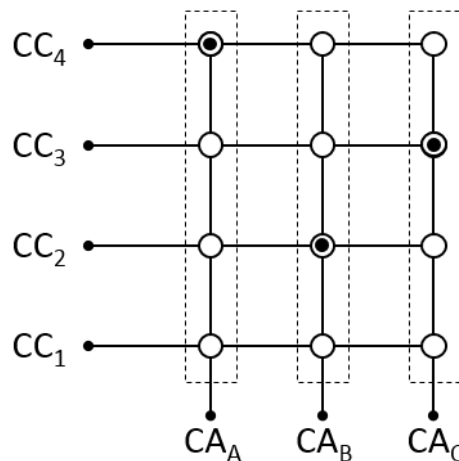


Figura 2.4 – Símbol del convertidor trifàsic de quatre nivells

De fet, hi ha diverses famílies de convertidors, i aquest pas d'ampliar els interruptors SPDT pel convertidor de dos nivells a uns SPMT per obtenir un convertidor multinivell només és vàlid per la família de convertidors multinivell NPC ("*Neutral Point Clamped*"), que és a la que pertany el convertidor utilitzat. Aquesta família requereix d'un major nombre de components semiconductors, fent el control molt més complex, però a canvi ofereix avantatges molt clars [1], entre d'altres:

- Millora del sistema global, ja que tenir els terminals intermedis de voltatge pot ajudar a controlar de forma més eficient el flux de potència, per exemple en el cas d'equilibrar els estats de càrrega entre bateries.
- Reducció de la distorsió harmònica del voltatge de sortida i per tant dels filtres necessaris.
- Reducció de les pèrdues de commutació, degut a que els dispositius no han de bloquejar tanta tensió.
- Pèrdues en forma de calor més repartides al sistema, el que comporta menor necessitat de dissipadors de calor.
- Millora en la fiabilitat del sistema, ja que la fallada d'un dispositiu no comporta la fallada total de la branca.

Els convertidors multinivell NPC poden tenir diferents estructures, anomenades topologies, segons com es distribueixin els dispositius semiconductors. Les quatre principals són:

- "*Active Clamped*" o "*Transistor Clamped*": es forma amb una concatenació piramidal d'interruptors SPDT o estructures de mig pont. Tots els blocs bàsics són interruptors SPST formats per un interruptor controlat i un díode. És l'estructura principal i de la que deriva la topologia real del convertidor emprat.
- "*Passive Clamped*" o "*Diode Clamped*": es forma eliminant els interruptors de la part interior de l'estructura piramidal formada pel cas anterior.
- "*Reduced Active Clamped*": es forma reduint el nombre de SPST emprats, amb dos pels camins interiors i un de sol pels extrems, obtenint una estructura de T per tres nivells, de π per quatre, i així successivament.
- "*Reduced Passive Clamped*": es forma eliminant els díodes de la part interna i fent connexions creuades.

A la Figura 2.5 es pot observar la topologia MAC ("Multilevel Active Clamped"), la primera de les quatre enumerades, formada per la connexió en piràmide dels interruptors SPDT, en el cas de quatre nivells. Es pot observar com per quatre nivells es necessiten tres senyals de control diferents, que governen els interruptors de manera que només pot haver-hi un nivell de contínua connectat al terminal d'alterna. A la mateixa figura, a la dreta, s'ha ressaltat en vermell l'estat de commutació del segon nivell. Per activar-se, el primer senyal de control ha de ser 1 i la resta 0. Els diferents estats de commutació i els seus senyals de control es poden veure a la Taula 2.1, i són els mateixos per les quatre topologies enumerades.

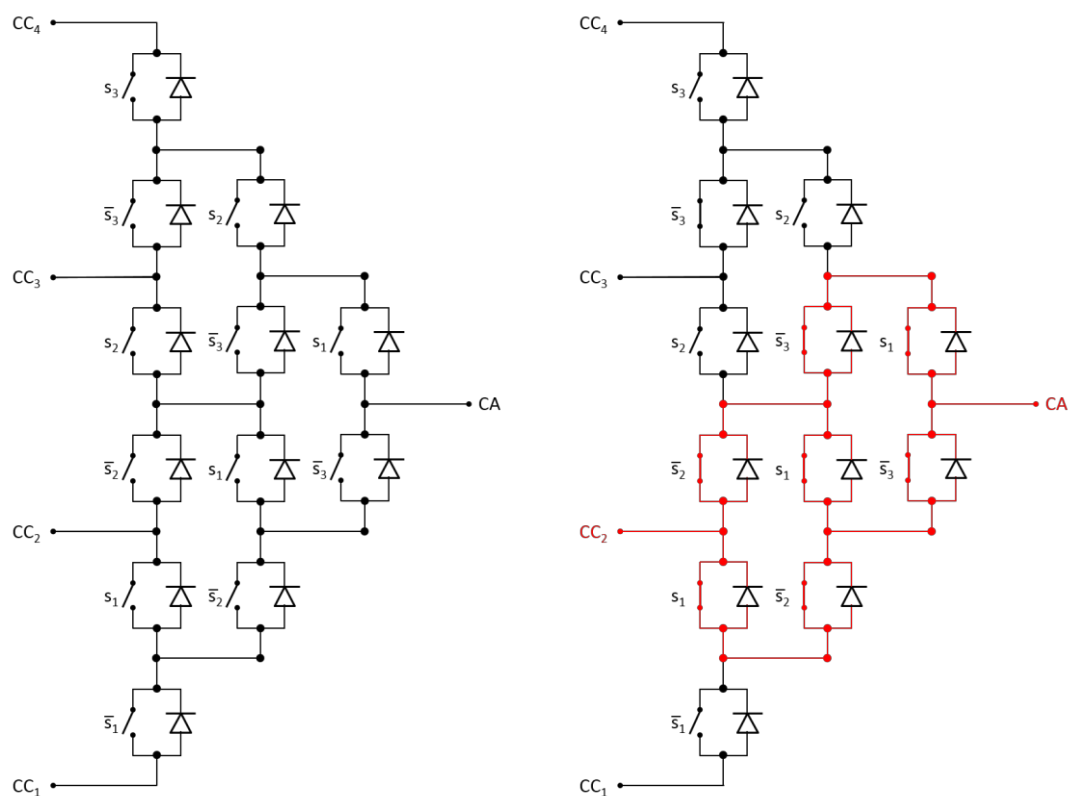


Figura 2.5 – Topologia MAC de quatre nivells i senyals de control (esquerra), i un estat de commutació ressaltat (dreta)

Estat	Connexió CA	s_1	s_2	s_3	V_{CA}
1	CC_1	0	0	0	$-V_{DC}/2$
2	CC_2	1	0	0	$-V_{DC}/6$
3	CC_3	1	1	0	$V_{DC}/6$
4	CC_4	1	1	1	$V_{DC}/2$

Taula 2.1 – Estats de commutació per una branca de 4 nivells d'un convertidor NPC

El convertidor emprat, però, no té exactament aquesta topologia, sinó que es classifica com a convertidor “*Extended Multilevel Active Clamped*” (EMAC) [2]. Aquesta extensió consisteix en afegir els interruptors SPST marcats en blau a la Figura 2.6 a la topologia MAC, per convertir l’estructura triangular en rectangular. Els interruptors addicionals es connecten en paral·lel al que tenen immediatament a la dreta, i comparteixen senyal de control amb ell.

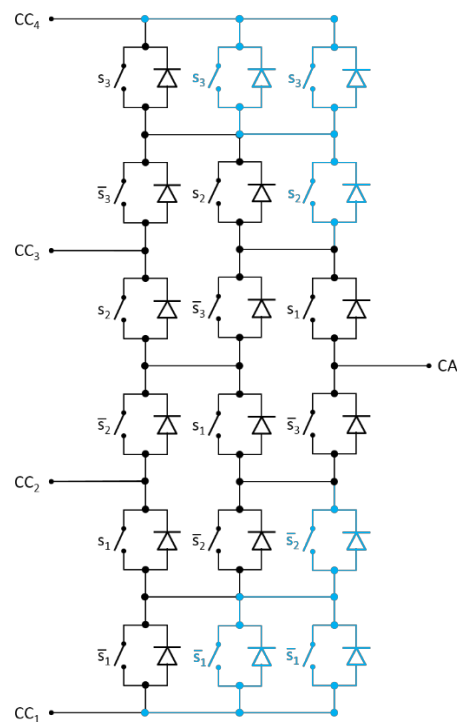


Figura 2.6 – Topologia EMAC de quatre nivells i senyals de control. Addicions respecte la topologia MAC en blau

El convertidor del laboratori és, finalment, un prototip format pel conjunt de tres branques com la mostrada en tres plaques de circuit imprès (PCB), muntades sobre unes altres plaques que consten de les connexions als terminals de contínua i d’alterna (Figura 2.7). El control d’aquest convertidor és molt més complex del que s’ha comentat en aquest apartat, i és una part crucial de la recerca duta a terme pel GREP, però no forma part dels continguts d’aquest treball.

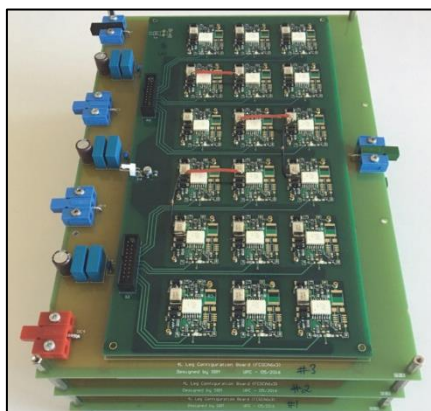


Figura 2.7 – Fotografia del convertidor del laboratori

2.2. Banc de proves

Per realitzar les proves amb el convertidor descrit, calen més elements, tant per alimentar el convertidor com per prendre mesures, passant per la càrrega i les bateries que formen part del circuit de potència. Tots aquests elements conformen el banc de proves en el que s'ha treballat.

El convertidor transmet la potència entre un sistema font i un sistema càrrega. En concret, la font és un grup de tres bateries de Liti de 4,3 A·h de càrrega nominal, que proporcionen una tensió entre borns d'entre 55 i 38 V (completament carregades o buides), i consten d'un BMS ("Battery Management System") que les desconnecta del circuit extern on estiguin connectades al passar per sota d'aquest llindar de tensió. La càrrega trifàsica són unes bobines en sèrie amb unes resistències a cada fase (càrrega RL). Les resistències són, de fet, unes estufes de varies etapes, que permeten regular la resistència total de la càrrega. Les proves amb el convertidor connectat a la càrrega es van fer amb uns valors de $L = 3 \text{ mH}$ i $R = 8,25 \Omega$, i els condensadors en paral·lel amb les bateries són de $C = 810 \mu\text{F}$. A la Figura 2.8 es pot veure l'esquema del convertidor connectat a les bateries i a la càrrega.

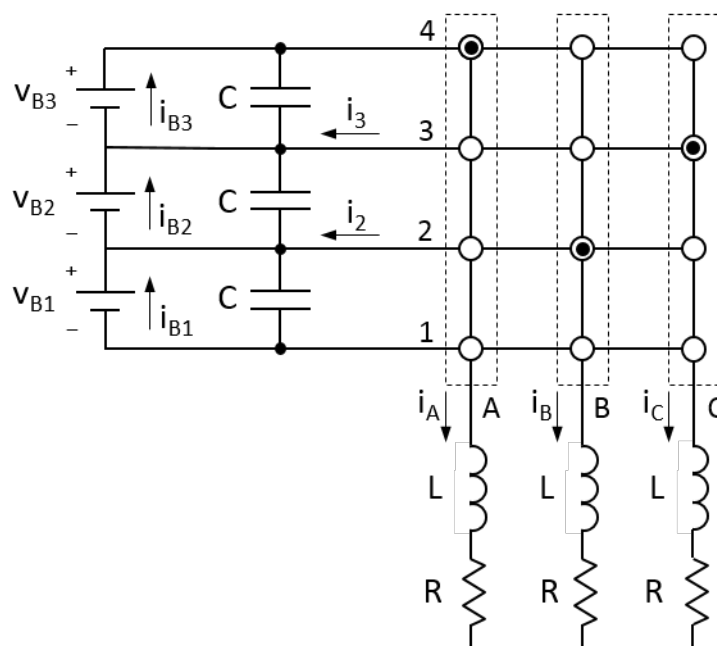


Figura 2.8 – Esquema del convertidor i els sistemes font (bateries, CC) i càrrega (RL, CA)

A més dels dos sistemes connectats al convertidor per possibilitar el flux de potència, el banc de proves consta dels dispositius de mesura com sensors, oscil·loscopi i càmera tèrmica, de control com la dSpace i l'ordinador, i d'alimentació com les fonts de CC, carregadors, SAI i la xarxa elèctrica. Tots els elements destacats es poden veure en les fotografies de l'Annex A.

Per altra banda, a continuació es descriuen breument tots els elements i la seva funció:

- Torre de sensors: consta de sensors de corrent i de tensió, i es connecta a la sortida de les bateries per poder-ne mesurar tensions i corrents.
- Placa de sensors de temperatura: és un petit prototip separat de la torre que mesura les temperatures de les bateries i la de l'ambient.
- dSpace: conjunt de processadors que permeten controlar el convertidor i rebre els senyals dels sensors. S'usa una placa DS1006 (processador) i tres DS5101 pels senyals de control. S'inclou també una placa de connexions externa on es connecten tots els sensors mitjançant cables BNC.
- Ordinador: és on es pot interactuar amb la dSpace per tal de programar el control i emmagatzemar les dades. La modulació es realitza amb un model de Simulink, i es fan servir altres programes com Matlab i ControlDesk per fer les proves.
- Oscil·loscopi: es fa servir per mesurar la potència al costat d'alterna, connectant dues sondes de tensió i dues de corrent amb una connexió Aron.
- Carregadors: serveixen per carregar les bateries. Estan numerats per fer servir sempre els mateixos en les mateixes bateries.
- SAI: sistema d'alimentació ininterrompuda. És una mesura de seguretat per si falla l'alimentació de la xarxa assegurar que no s'apaga el sistema i es pot, com a mínim, desar les dades recollides.
- Càmera tèrmica: càmera d'infrarojos Keysight U5855A, per poder registrar les temperatures del convertidor durant les proves.
- Fons de CC: tres fonts independents per alimentar els components electrònics del convertidor, així com els sensors de la torre i de temperatura. En les primeres proves també es van fer servir tres fonts més en substitució de les bateries.
- Càrrega electrònica: aparell que es pot programar per forçar, per exemple, un corrent constant, i descarregar de forma controlada les bateries.

Degut a la quantitat d'elements i sobretot al gran nombre de connexions i cablejat entre ells, totes les connexions importants que es desconnectaven per seguretat o necessitat entre proves es van numerar curosament. A la Figura 2.9 es poden veure dos exemples, un amb els números de les bateries en etiquetes, i l'altre en forma de marques als cables.

A la Figura 2.10 es pot veure també una visió general del banc de proves del laboratori, i finalment a la Figura 2.11 es pot veure el convertidor connectat, amb tots els cables i la torre de sensors al fons.

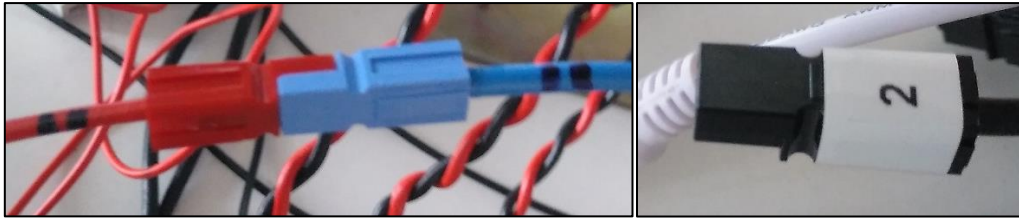


Figura 2.9 – Numeració de diferents connexions



Figura 2.10 – Fotografia del banc de proves complet

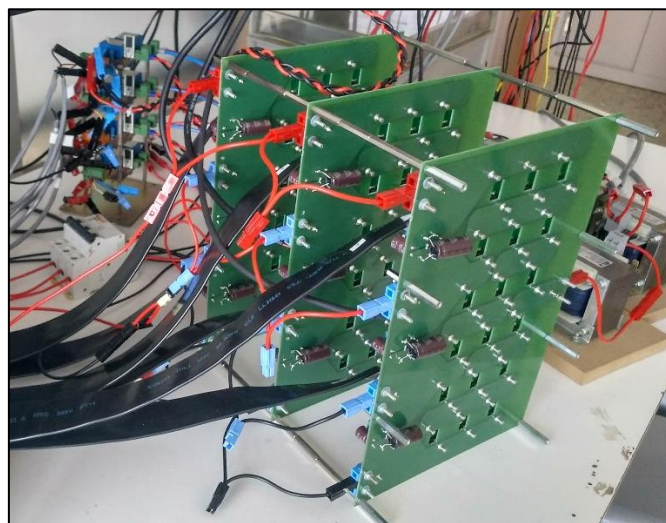


Figura 2.11 – Detall del convertidor amb la torre de sensors al fons

3. Automatització de la captura de mesures

Per tal de dur a terme les proves, la primera tasca a realitzar era aconseguir que tots els aparells de mesura prenguessin dades de forma automàtica i periòdica, ja que no és factible ni fiable prendre mesures manualment.

Com s'ha vist al capítol anterior, al sistema tenim tres entrades de dades diferenciades: l'oscil·loscopi, que captura tensions i corrents de la part d'alterna del convertidor, i calcula la potència; els sensors de tensió i corrent de la part de contínua, connectats a la *dSpace*, i la càmera tèrmica, que ens permet observar la distribució de temperatures en cada moment.

Així doncs, en aquest capítol es mostraran les tasques realitzades per automatitzar la presa de dades en cada un d'aquests tres flancs.

3.1. Captura de l'oscil·loscopi

3.1.1. Estructura bàsica i primer programa

L'oscil·loscopi del que es disposa en el sistema és de la marca *Tektronix*, concretament el model MSO3054 (*"Mixed Signal Oscilloscope" 3054*), que permet la comunicació amb un ordinador mitjançant diversos canals, per exemple connectant-los mitjançant un cable USB o a través de la xarxa amb un cable Ethernet.

Si bé mitjançant la connexió USB el propi ordinador ja tenia instal·lat un programa que detectava de forma automàtica l'oscil·loscopi i permetia fer-hi canvis en la configuració i desar captures de pantalla, el que es necessitava era una programació molt més complexa i automatitzada, preferiblement a través de *Matlab*, per poder capturar dades periòdicament de forma fiable amb una freqüència establerta a l'inici de la prova i durant períodes de temps llargs, al voltant d'una hora, i després desar aquestes dades en un format compatible per poder-les processar amb les altres dades usant el propi *Matlab*.

Per poder comunicar l'oscil·loscopi amb el *Matlab* cal crear un objecte de tipus VISA (*"Virtual Instrument Software Architecture"*), una forma de comunicació entre dispositius i ordinadors molt estesa en el món de les proves i mesures, estandarditzada per diverses companyies, entre les quals *Tektronix*, la marca de l'oscil·loscopi del banc de proves. *Matlab* té ja integrada una comanda per crear objectes d'aquest tipus de forma senzilla, només cal especificar la marca i les especificacions de la comunicació.

L'objecte VISA de *Matlab*, pel banc de proves d'aquest treball, podia establir comunicació amb l'oscil·loscopi tant per USB com amb un cable Ethernet usant el model TCP/IP (*"Transmission Control Protocol/Internet Protocol"*, un dels protocols principals d'internet per transmetre dades). En cas de fer-ho via USB, es necessiten els números identificadors de marca, model i producte de l'oscil·loscopi, que es poden trobar en el seu menú de configuració de connexions (botó *"USBTMC Configuration"*) i es pot veure a la Figura 3.1. Per comunicar-se via TCP/IP, cal que ordinador i oscil·loscopi estiguin connectats a la mateixa xarxa i cal especificar la direcció IP del dispositiu, també definida al menú de connexions de l'oscil·loscopi (botó *"Ethernet Network Settings"*).

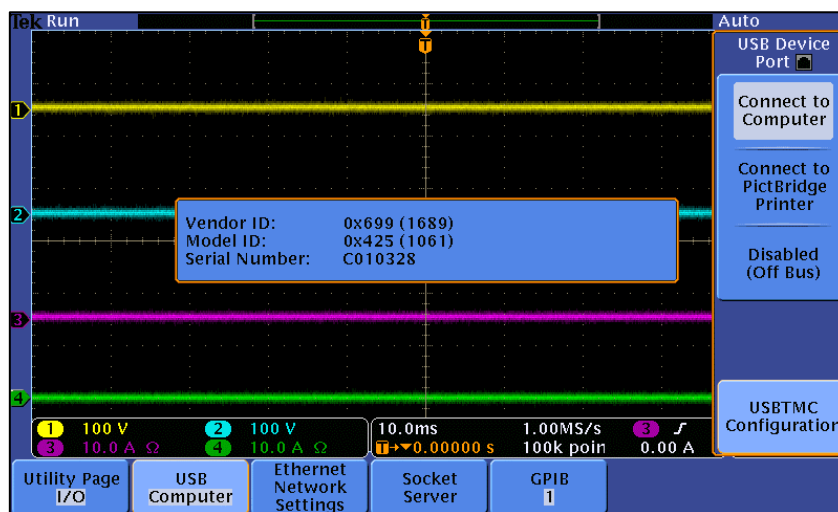


Figura 3.1 – Menú de configuració de connexions de l'oscil·loscopi, i dades de la connexió USB

Un cop creat l'objecte VISA per establir la comunicació, independentment de quin mètode es triï, s'han d'enviar les ordres des de l'ordinador fins l'oscil·loscopi, que té el seu llenguatge propi de programació. Llegint el manual del programador per la sèrie MSO3000 de *Tektronix* [3], es poden trobar totes les comandes necessàries per aconseguir la comunicació.

L'oscil·loscopi està configurat de manera que a partir dels senyals captats pels 4 canals d'entrada (dues tensions i dos corrents a les fases apropiades de la part d'alterna trifàsica per fer una connexió Aron), calculi la potència instantània i la mostri pel canal *"Math"*. A partir d'aquest canal es crea una mesura que fa la mitjana per cada període (opció *"Measure – Mean"* a l'oscil·loscopi), i mostra el valor per pantalla. Aquesta mesura és la que es vol enviar a l'ordinador i anar registrant segons avanci la prova per desar el conjunt al finalitzar. Per tant, s'ha d'enviar una comanda des de *Matlab* perquè l'oscil·loscopi retorni la mesura en els instants adequats, i el *Matlab* ha de poder reconèixer aquesta dada entrant i afegir-la a un registre que es desi quan s'arribi al final de la prova.

Aquesta tasca implica, de fet, dos nivells diferents de llenguatge, primer el codi habitual de *Matlab* per indicar que s'ha d'enviar o rebre alguna dada respecte un aparell extern mitjançant la VISA, i per altra banda l'ordre que s'envia ha d'estar en el llenguatge de programació que entén l'oscil·loscopi, en aquest cas, una consulta ("QUERY") sobre una mesura.

Amb tot el que s'ha descrit fins ara, tenim l'esquelet bàsic del programa final per automatitzar la captura de dades de l'oscil·loscopi usat durant les proves del convertidor (el programa complet amb es pot veure a l'Annex B.1, però introdueix moltes millores que es descriuran als apartats següents), que es basa en les comandes de *Matlab* següents:

```
g1 = visa('tek', 'TCPIP0::147.83.138.70::INSTR');
g2 = visa('tek', 'USB::0x0699::0x0425::C01032::INSTR');
fopen(g1);
fprintf(g1, 'measurement:meas1:value?');
dada = fscanf(g1);
fclose(g1);
```

Primer es crea un objecte VISA del tipus desitjat (a l'exemple, es creen dos objectes diferents, un per cada tipus, amb les dades exactes de l'oscil·loscopi emprat al laboratori per dur a terme les proves), després s'obre el canal de comunicacions (a l'exemple, a partir d'aquí tot es fa sobre el primer objecte VISA), s'envia la comanda en el llenguatge de l'oscil·loscopi (l'interrogant final indica que és una consulta), i després s'ha d'escanejar per recollir la dada demanada. Finalment es tanca el canal.

A partir d'aquesta estructura bàsica, és senzill ampliar el programa per enviar l'ordre a l'oscil·loscopi i recollir la dada de forma periòdica, i anar emmagatzemant les dades en una matriu de vectors del tipus [temps, mesura] que es vagi ampliant segons es recullin noves dades i finalment es desi com un arxiu independent. Queden com a paràmetres el temps entre captures de dades i el temps total de la prova.

Per tenir encara més informació sobre l'oscil·loscopi durant les proves, a més de la captura de les dades numèriques també es va implementar una captura de pantalla de l'oscil·loscopi, que es desa com un arxiu a part un cop el *Matlab* la rep. El nom de l'arxiu, per evitar possibles confusions, i poder diferenciar-los tots un cop s'acaba la prova, conté la data i hora de captura de la imatge, i es desa en un directori nou cada cop que s'executa el programa (es considera que serà una prova nova), juntament amb l'arxiu de dades numèriques. Aquesta informació gràfica, al ser addicional, no cal que es prengui amb la mateixa freqüència que les dades de potència, i en algunes proves pot ser millor que no es faci, així que es deixen com a paràmetres si es vol activar la captura de pantalla i en cas afirmatiu, la freqüència de captures.

Per realitzar aquestes captures es segueix el mateix procediment que per capturar dades numèriques, però amb les ordres en llenguatge de l'oscil·loscopi pertinents. En aquest cas, només obrir l'objecte VISA cal indicar que la mida de la imatge serà 480x800x3 (la resolució en píxels de la pantalla per les 3 capes corresponents als colors RGB), llavors es poden configurar format i orientació de la imatge i finalment enviar l'ordre de fer la captura ("*HARDCOPY Start*"). Al llegir la imatge com un seguit de bytes en una matriu de tres dimensions, es va observar que el *Matlab* desordenava les dades de forma que si es mostraven com a imatge no s'assemblava gens a l'original. Reordenant les dimensions i ajustant algunes dades es va aconseguir representar correctament la imatge, i per tant ja es podia desar com un arxiu normal.

3.1.2. Interfície gràfica

El programa descrit fins ara fa el just i necessari per capturar correctament les dades durant proves llargues, per tant compleix amb l'objectiu i demostra que és possible comunicar l'oscil·loscopi amb l'ordinador per fer aquesta tasca, però, per començar, no és gens còmode ni intuïtiu, ja que abans d'executar-lo cal definir tots els paràmetres manualment canviant el codi del programa, i, a més, un cop iniciada la prova amb el temps establert, les dades no es desen fins que no s'arriba al final i per tant, si la prova dura poc o hi ha algun error i s'ha de parar la prova al cap de poc temps d'haver-se iniciat, només queden dues opcions: esperar a que s'esgoti el temps establert a l'inici (que serà de l'ordre d'una hora) o cancel·lar l'execució i perdre tot el registre.

Per corregir aquestes mancances es va decidir introduir una interfície gràfica que permetés a l'usuari canviar els paràmetres còmodament a l'executar el programa, tenir uns valors comuns per omisió per evitar feina extra, i afegir uns botons d'inici i final de captura per tenir més control sobre el programa i poder desar les dades de forma immediata si alguna cosa va malament i s'ha aturat la prova de forma prematura.

El primer que cal considerar és que la versió de *Matlab* al laboratori és la R2011b, i per tant moltes de les funcions implementades recentment en versions més actuals no funcionaran en aquesta versió. Per sort, una de les formes més senzilles de crear objectes d'interfície gràfica per l'usuari (GUI) al *Matlab* és usant els objectes "*uicontrol*", que existeixen des d'abans de la versió 2006a [4] i permeten fer tot el que es necessita per millorar el programa. Només caldrà adaptar la programació entorn aquests objectes al que està disponible en aquesta versió antiga, i buscar alternatives a les comandes introduïdes en versions més actuals.

Els objectes “*uicontrol*” són interfícies gràfiques per permetre la interacció entre l'usuari i el programa, n'hi ha de diversos tipus i tenen una gran varietat de propietats útils pel programa. En versions recents de *Matlab*, aquests objectes es reconeixen com a tals, tenen un tipus diferenciat i es pot cridar i editar qualsevol de les seves propietats de la forma “*nomObjecte.nomPropietat*”, però en la versió del laboratori això encara no estava implementat, i cal fer servir mètodes més antics com el “*get*” per obtenir una propietat i el “*set*” per definir un valor d'una propietat concreta.

Les propietats que s'han fet servir per desenvolupar el programa són:

- *Style*: defineix l'estil o el tipus d'objecte. Per exemple, pot ser un botó, una casella a marcar, un quadre de text editable o no, etc.
- *Value*: el valor numèric de l'objecte. Depenent del tipus d'objecte, aquest valor pot estar relacionat amb altres propietats, ser 1 o 0, o ser el valor introduït, etc.
- *Max*: valor màxim, fixat a 1 per omisió. És el valor que agafen, per exemple, els botons al ser premuts o les caselles al ser seleccionades.
- *Min*: valor mínim, fixat a 0 per omisió. És el valor que agafen, per exemple, els botons no premuts o les caselles no seleccionades.
- *String*: text que es mostra amb l'objecte. Si és un botó o un quadre de text, es mostra a dins, si és una casella que es pot seleccionar, al costat.
- *Foreground Color*: color del text, a negre per omisió.
- *Background Color*: color del fons de l'objecte, a gris clar per omisió.
- *Visible*: indica si l'objecte es pot veure, amb 'on' o 'off'.
- *Enable*: indica si l'usuari pot interactuar amb l'objecte i canviar el seu estat, també amb 'on' o 'off'.
- *Position*: vector de quatre valors que indiquen posició i mida de l'objecte. Les magnituds estan en les unitats que indiqui la propietat “Units”. Els components del vector, per ordre, sempre són:
 - *Left*: distància entre el marge esquerre de la figura (finestra) que conté l'objecte i el marge esquerre del propi objecte.
 - *Bottom*: distància entre el marge inferior de la figura (finestra) que conté l'objecte i el marge inferior del propi objecte.
 - *Width*: amplada de l'objecte, distància entre marges esquerre i dret.
 - *Height*: alçada de l'objecte, distància entre marges superior i inferior.
- *Units*: unitats de mesura, fixat a píxels per omisió.

- Callback: funció que es crida quan s'interactua amb l'objecte (es prem un botó, es selecciona una casella, es mou un lliscador, etc.). Les funcions es poden escriure dins aquesta propietat o ser una etiqueta ("*handle*", indicat amb una @) per cridar una funció externa.
- Tag: identificador de l'objecte proporcionat manualment en forma de String.

Els objectes "*uicontrol*" tenen més propietats que les descrites, però amb totes aquestes es pot definir una interfície còmoda per l'usuari que permeti definir les propietats de la captura de dades per les proves amb el convertidor.

Abans de crear cap objecte d'interfície gràfica, però, cal definir la figura de *Matlab* que contindrà tots els objectes (es diu que serà el seu "pare"), i farà les funcions de panell de control per tots els paràmetres, engegada i aturada de la captura de dades. Aquesta figura (que serà una finestra nova a l'ordinador) no ha de seguir la numeració de figures típica de Matlab, ha de tenir un nom distintiu, i ha d'aparèixer en un lloc adequat amb les dimensions apropiades, a més de tenir un color de fons correcte. Totes aquestes propietats es poden definir i editar de manera anàloga a com s'ha explicat pels objectes "*uicontrol*", i per tant és el primer que farà el programa.

Un cop creada la figura que farà de panell de control, cal veure quins objectes es necessiten. Està clar que hi ha d'haver un per controlar cada paràmetre lliure dels discutits a l'apartat anterior, a més d'un botó d'inici i un de final. A més, també seria convenient deixar triar si es vol connectar l'oscil·loscopi amb una VISA per USB o per TCP/IP. Per tant, finalment, es té:

- Un quadre de text editable per entrar el temps total de la prova.
- Un quadre de text editable per entrar el retard entre mesures.
- Una casella per seleccionar si es volen fer captures de pantalla.
- Un quadre de text per decidir cada quant es fan les captures.
- Dues caselles de selecció excloents per decidir el tipus de VISA.
- Un botó per iniciar la captura.
- Un botó per aturar la captura.
- Text adicional no editable per indicar què és cada cosa.

A més, cal tenir en compte que el quadre per decidir cada quant es fan les captures de pantalla només ha d'estar actiu si la casella de selecció anterior està activada, que el botó d'aturada només s'ha d'activar si s'inicia la captura, que el botó d'inici s'ha de desactivar quan s'hagi iniciat la captura, que cal crear un grup d'objectes perquè les caselles de selecció del tipus de VISA siguin excloents, i que s'han de posar valors per omissió que siguin els habituals.

Per habilitar i inhabilitar el requadre de les captures de pantalla segons l'estat de la casella anterior, només cal definir una funció que es cridi cada cop que es prem la casella (propietat "Callback") i que faci justament això, si la casella està seleccionada (valor = 1) ha d'habilitar el requadre de text ("Enable" = 'on') i si no, l'ha d'inhabilitar. En versions recents de *Matlab*, les funcions es poden escriure al final d'un arxiu de codi (script amb extensió .m), però a la versió del laboratori això encara no era possible i cal definir la funció en un arxiu independent del mateix directori. Les funcions de "Callback" necessiten sempre dos paràmetres d'entrada, el primer sempre és l'objecte que les origina, i el segon les dades de l'esdeveniment que l'han originat.

És important destacar també, en aquest punt, que a l'entrar dins d'una funció a un arxiu diferent, moltes de les variables i objectes definits al programa principal deixen de poder-se referenciar de la mateixa manera. A l'estar mirant a un nivell inferior, només dins la funció, el *Matlab* només reconeix els paràmetres d'entrada. Però és habitual, i en aquest cas necessari, referenciar altres objectes per poder-los editar, en aquest cas, la casella que indica si fer foto o no és el paràmetre d'entrada, però cal actuar sobre el requadre de text següent, que no està definit dins el rang de la funció.

Per aconseguir trobar objectes fora del rang del nivell on està mirant el programa (també se l'anomena "Scope"), es pot fer servir la funció "*findobj(propietat, valor)*", que fa just això, troba els objectes que tenen una propietat amb el valor indicat. Aquesta funció és molt útil i té opcions molt diverses, però en aquest programa s'usa bàsicament la cerca d'objectes pel valor de les seves etiquetes o identificadors (propietat "Tag"), que s'han definit de forma única per cada objecte. Després amb les comandes "*get(objecte, propietat)*" i "*set(objecte, propietat, valor)*" es pot actuar sobre les propietats dels objectes trobats, i actualitzar els valors segons convingui.

Fer que les caselles del tipus de VISA siguin excloents comporta crear un grup de botons (un objecte "*uibbuttongroup*") i dir que sigui el pare dels dos objectes "*uicontrol*" del tipus "*radiobutton*" (casella circular) que representen cada tipus de VISA. Simplement cal definir l'objecte de grup amb les seves propietats (nom, posició, color i etiqueta) i llavors, al definir les caselles, començar dient que depenen del grup posant el nom de la variable de l'objecte grup, i després seguir definint les propietats com en tots els altres objectes. L'aspecte del grup i les caselles es pot observar a la Figura 3.2.

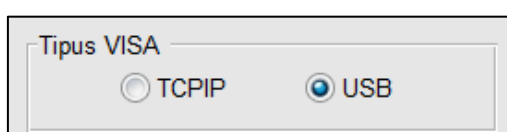


Figura 3.2 – Grup de botons pel tipus de VISA al panell de control

Pel que fa als botons d'inici i aturada, el seu funcionament anirà lligat a la execució del programa principal. Ara el bucle que va prenent dades i captures de pantalla seguint l'estructura descrita a l'apartat anterior no és el programa a executar des de l'inici, sinó que s'ha de cridar quan es premi el botó d'inici. És a dir, és la funció de *"Callback"* del botó d'iniciar la captura, i per tant ha d'anar en un fitxer separat com una sola funció al mateix directori que el programa que crea tots els objectes del panell de control, i ha de poder actuar sobre ells per tenir informació del que està passant en cada moment (un cert *"feedback"* per part del programa).

El primer que es fa és definir els botons al programa principal de manera que el d'inici estigui habilitat i el d'aturada no, i fent que el botó d'inici cridi el programa original en forma de funció, ara anomenada *"starttest"*, mentre que el botó d'aturada directament tanca el panell de control sencer.

A la funció *starttest* el primer que es fa és cercar tots els objectes del panell de control als que s'ha d'accedir o fer canvis durant l'execució. Per tant, cal cercar tots els quadres de text i caselles on s'han escrit els valors dels paràmetres que indiquen el temps total de la prova, el retard entre dues mesures, si cal fer captures de pantalla, el temps entre captures, i el tipus de connexió per definir l'objecte VISA, però també cal trobar el botó d'aturada per poder-hi actuar. El botó d'inici és el que crida la funció i per tant ja es té com a paràmetre d'entrada. Un cop trobats tots els objectes, cal habilitar el botó d'aturada i inhabilitar tota la resta, per impedir que l'usuari canviï cap paràmetre mentre s'executa la funció i es pensi que el canvi tindrà efecte a mig programa. A més, per indicar que tot funciona correctament, es canvia el color del botó d'inici a blau i el seu text de *"INICIA LA CAPTURA"* a *"CAPTURANT"*.

Els valors dels paràmetres es desen en variables segons el valor que tinguin els objectes del panell de control, i arribats a aquest punt s'executa el programa com abans d'introduir la interfície gràfica. Ara, però, cada cop que el programa s'espera el temps indicat entre captures de dades, també comprova que el panell de control estigui encara present. Si es prem el botó d'aturada o es tanca la finestra del panell de control, llavors el programa detectarà que el panell ja no existeix i que s'ha d'aturar la captura immediatament. El que fa és, de fet, trencar el bucle principal del programa que va repetint la captura de dades abans de que s'arribi a la condició de final (es trenca de forma prematura abans d'arribar al temps total establert), i continuar amb la part final del programa que tanca el canal i desa el fitxer de dades.

Per tant, amb aquest programa es poden fer proves llargues i també interrompre la captura quan es desitgi sense perdre cap dada ja captada pel *Matlab*. A més, només cal executar el programa principal, definir els paràmetres de forma intuïtiva i iniciar la prova.

Per fer l'execució del programa més ràpida de cara a les proves amb el convertidor, als quadres de text editables dels paràmetres de temps total, retard i cada quantes dades fer una captura de pantalla es poden posar valors per omisió que siguin raonables i que es mantinguin per totes les proves. Per exemple, al temps total es pot posar un valor bastant superior a una hora, per assegurar que no s'acabarà abans la captura que la prova, com ara 4800 segons. El retard entre captures de dades es va decidir fixar en 30 segons, ja que la potència de la banda d'alterna no ha de variar de forma significativa en poc temps, i així es deixa un temps de descans al programa raonable obtenint 120 dades per una hora de prova. En el cas de fer-se captures de pantalla (que per omisió la casella estarà activada), es va decidir posar un valor predeterminat de fer una captura de pantalla cada 10 dades numèriques capturades, per tenir una imatge cada 5 minuts de prova. Aquesta informació és totalment addicional, així que no cal sobrecarregar l'ordinador amb imatges de l'oscil·loscopi. Finalment el tipus de VISA predeterminat es va decidir que fos l'USB.

A la Figura 3.3 es pot veure el panell de control en dos estats diferents, el primer amb la casella de fer foto seleccionada, i per tant amb el requadre següent habilitat, i amb el tipus de VISA seleccionat a TCPIP; i el segon amb la casella no seleccionada, i per tant el requadre següent inhabilitat (en gris, i no es pot editar el número), i amb la casella de USB seleccionada. Ambdós casos tenen els valors predeterminats als paràmetres de temps total, retard i cada quan fer la captura de pantalla. També es pot veure com el botó verd d'iniciar la captura està habilitat mentre que el vermell d'aturada no, ja que encara no hi ha una captura en marxa.

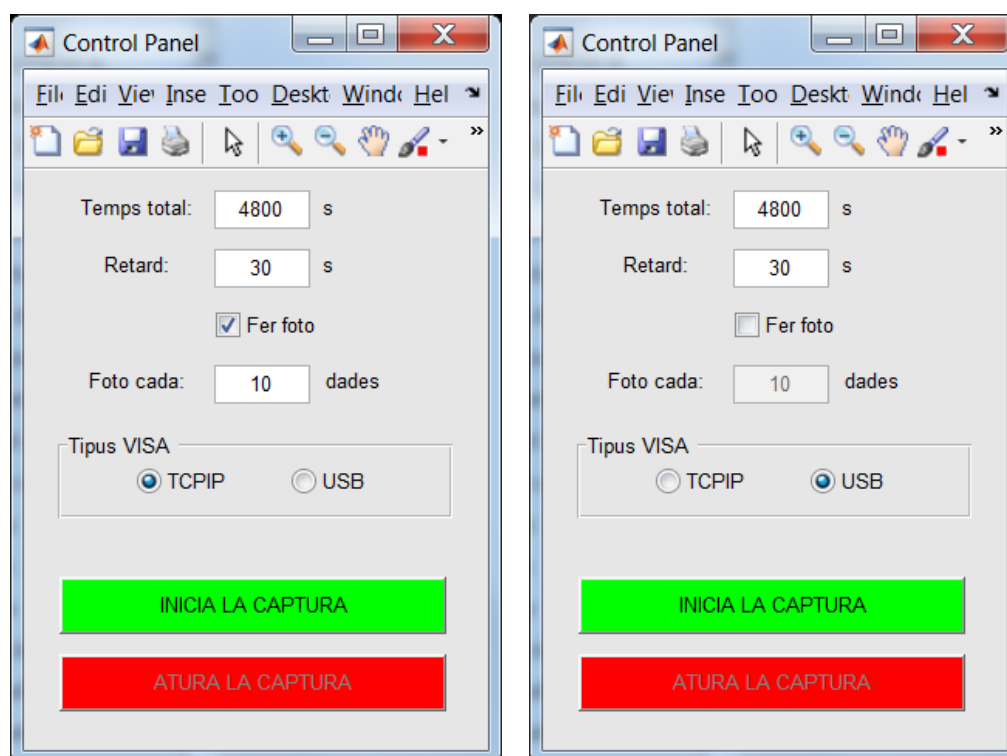


Figura 3.3 – Panell de control amb les parts descrites i diferents configuracions

3.1.3. Sincronització i millores finals

El programa final inclòs a l'Annex B.1 inclou algunes millores addicionals programades un cop es tenia llesta la interfície gràfica. En aquest apartat es poden veure totes fins arribar al programa annexat, que és el que es va fer servir durant les proves del convertidor.

La primera i més important té a veure amb la programació del temps d'espera entre captures de mesures numèriques, que en el primer programa es feia simplement fent una pausa a l'execució del temps indicat. Aquest sistema pot ser terrible en proves llargues, ja que les aturades són sempre del temps indicat, però les altres comandes no triguen un temps nul en executar-se i, per tant, les pauses no es feien en els temps indicats, i l'error s'anava acumulant.

Per solucionar aquest problema, es va canviar d'un control temporal per retards a una comparació amb un rellotge. Quan s'inicia el programa es consulta l'hora actual, convertida a segons, i s'estableix el final com l'inici més la durada establerta. Mentre no s'arribi al final, s'ha d'executar un bucle de capturar mesures i esperar el temps establert. Amb la correcció ja no es pausa el programa tot un retard, sinó que es compara l'hora actual (passada a segons) a cada cicle amb el temps d'inici més el nombre de cicles pel temps de retard (el moment en que s'ha de prendre la mesura), i només quan es supera aquest llindar continua el cicle i es pren la mesura següent. S'ha hagut d'incloure un temps de pausa mínim per evitar que el programa es bloquegi per mirar constantment l'hora en cada moment, però és de 0,1 segons, i de cometre's un error, com a màxim seria aquest i el més important és que no s'acumula segons van avançant els cicles, perquè la comparació és sempre respecte el temps pertinent.

De totes les maneres possibles de representar i comparar temps, i demanar l'hora actual de les que disposa Matlab, es va haver d'utilitzar una compatible amb la versió del laboratori, en concret la comanda "*clock*", que representa data i hora com un vector de sis components.

La segona millora està relacionada amb l'organització d'arxius. Ja s'ha comentat que per agrupar totes les captures de pantalla i el fitxer de dades numèriques de cada prova, el programa creava un directori nou cada cop que s'executava i hi desava tots els fitxers a dins. Aquest directori sempre s'anomenava igual i si es volia executar el programa per segon cop, calia canviar-li el nom al primer o esborrar-lo per no mesclar dades. Està clar que això no és pràctic, i per tant es va fer que cada cop que s'executa el programa i s'inicia una captura, es creï un directori amb el principi del nom comú ("*Test*"), però que es numerin de forma consecutiva. El programa llegeix totes les carpetes del directori actual, veu quin és l'últim número de les carpetes anomenades "*Test*" i crea una nova amb el número següent.

La tercera millora és un petit conjunt de comandes al final de la captura que creen un gràfic a partir de les dades capturades en funció del temps. Així al finalitzar cada prova es pot veure l'aspecte de les mesures obtingudes per saber si segueixen l'aspecte previst o hi ha hagut algun error. També desa aquest gràfic amb la resta d'arxius de la prova.

Finalment, la última modificació permet la sincronització de l'inici de la captura de dades de l'oscil·loscopi (que està connectat a la part d'alterna del convertidor) amb l'inici de la captura de dades de la part de contínua, controlada per la *dSpace* i el *ControlDesk*. En el moment en què s'inicia la captura de dades des del *ControlDesk*, sempre es crea un arxiu temporal en el mateix directori (dins la carpeta del projecte i model actiu), independentment d'on es vulgui desar l'arxiu final amb tot el registre de dades. Per tant, sincronitzar les dues preses de dades és fer que el programa de captura de l'oscil·loscopi miri el directori en qüestió, i quan detecti la creació del nou arxiu comenci la captura immediatament. Hi haurà un cert retard d'inici però serà constant durant tota la prova i negligible pels casos estudiats i les freqüències de captura.

Per aconseguir-ho, es va decidir afegir un temps d'escaneig al prémer el botó verd d'inici de la prova al panell de control. Si durant aquest temps es crea un arxiu temporal al directori especificat (com sempre és el mateix, es desa en una variable a l'inici del programa), llavors s'inicia la captura. Si passa un temps màxim, llavors es torna a l'estat inicial, just abans de prémer el botó verd. També es va afegir, per si fes falta en alguna prova, per exemple comprovar el funcionament del programa sense encendre el convertidor, una casella al panell de control per desactivar el temps d'escaneig i passar directament a capturar només prémer el botó verd.

Dins la funció *starttest* que es crida al prémer el botó verd, per comprovar si es crea un arxiu nou al directori especificat, només fer-se la crida es registra el contingut del directori. Cada 0,1 segons (una pausa necessària per no col·lapsar l'ordinador) es torna a mirar el contingut del directori, si no hi ha cap diferència llavors es segueix comprovant fins que s'arriba al temps màxim d'escaneig (fixat a 30 segons), però si es detecta una diferència, llavors es trenca immediatament el bucle i s'inicia la captura. Aquest bloc de codi, està clar, només s'executa si no es selecciona la casella d'iniciar la captura de dades immediatament al panell de control.

El procediment per començar les proves, quan es volen registrar totes les dades i amb el major sincronisme possible, és executar primer el programa principal de captura de l'oscil·loscopi des de *Matlab*, configurar els paràmetres del panell de control i prémer el botó verd d'inici de captura, acció que iniciarà l'escaneig. Llavors cal iniciar la captura de dades de la part de contínua, abans de que passin 30 segons, i ambdues captures s'iniciaran gairebé alhora.

Per diferenciar el nou estat del programa que introdueix aquesta última millora també es va fer que al prémer el botó verd per escanejar el directori pertinent, tot quedés inhabilitat i el botó passés a tenir un color taronja i el text “ESCANEJANT...” a dins, per fer saber a l’usuari l’estat en el que es troba en cada moment el programa. També es va fer que, d’arribar al temps màxim de captura, el botó tornés a verd (mentre captura és de color blau) i digués “CAPTURA ACABADA”, alhora que el botó vermell passa a dir, simplement “TANCA”. Aquests canvis d’estat els podem veure les quatre captures de la Figura 3.4.



Figura 3.4 – Panell de control en diferents estats de la captura: (a) Inici del programa. (b) Buscant l’arxiu temporal. (c) Capturant dades de l’oscil·loscopi. (d) Amb la captura finalitzada

Ara sí, aquest és el programa utilitzat per capturar dades de l’oscil·loscopi durant les proves del convertidor, i el codi del qual es pot trobar a l’Annex B.1.

3.2. Captura al *ControlDesk*

La segona entrada de dades capturades prové dels sensors de la part de contínua del convertidor. Com hem vist al capítol anterior, aquests sensors estan connectats a la *dSpace*, i gràcies al model de *Simulink* del sistema, i a l'enllaç d'aquest model amb el programa *ControlDesk*, aquestes dades es poden veure en aquest últim programa en temps real.

El *ControlDesk* permet tenir un espai de treball on controlar les variables del model de *Simulink* que es desitgin, o veure les dades d'interès, com ara el valor de totes les mesures dels sensors. Si bé la configuració principal d'aquest espai ja havia sigut realitzada prèviament, era recomanable entendre com funciona el programa, o com a mínim les comandes i funcions bàsiques emprades durant la preparació i funcionament del banc de proves del convertidor. A més, per acabar de refinar la captura de dades, també calia fer un parell de modificacions.

3.2.1. Funcionament bàsic del *ControlDesk*

Per poder treballar amb el programa, primer cal entendre el seu funcionament bàsic. Per fer-ho, es va crear un model senzill de *Simulink* amb un bloc d'entrada d'un canal de la *dSpace* i un guany, i es va vincular a un projecte nou de *ControlDesk*.

En vincular el model, a la part inferior de la pantalla, a la pestanya "Variables", apareixen totes les variables que es poden visualitzar o editar. A la part dreta de la pantalla es pot entrar a la pestanya "Instrument Selector" per veure tota la varietat d'elements que es poden afegir al projecte, des de gràfics i requadres per visualitzar valors d'algunes variables fins a caselles i lliscadors per canviar el valor d'altres. A la Figura 3.5 es pot veure l'aspecte de la pantalla principal.

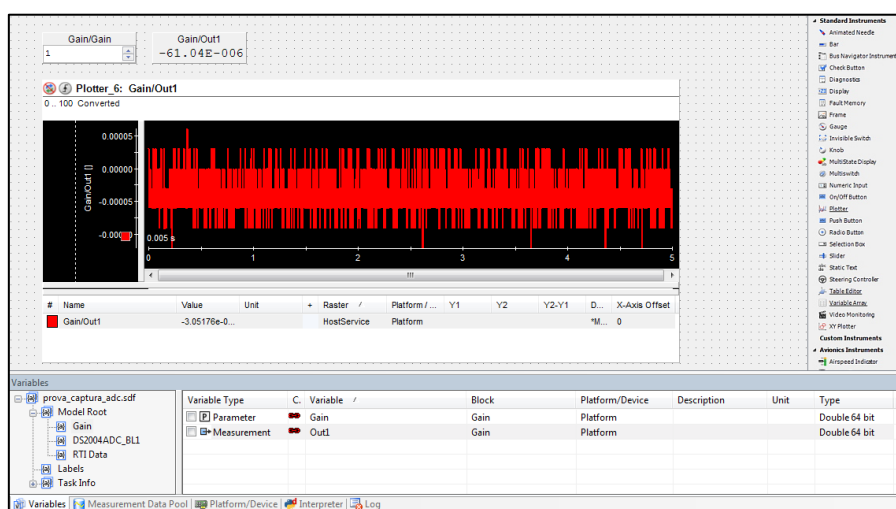


Figura 3.5 – Espai de treball del *ControlDesk* (captura de pantalla retallada)

Per fer que una variable es vegi a un instrument, només cal arrossegar primer l'instrument desitjat a l'espai de treball i després arrossegar la variable a l'instrument. Al model senzill creat com a exemple només es disposa de dues variables (guany i tensió a la sortida), però està clar que al projecte del convertidor n'hi haurà moltes més. Segons la naturalesa de la variable seleccionada cal decidir si vincular-la a un instrument de visualització (gràfic, requadre, indicador...) o d'edició (quadre de text editable, lliscador, selector...). Quan es vincula una variable a un instrument apareix una icona vermella en forma de cadena, per indicar que s'ha vinculat correctament. Quan s'executa el programa (s'inicien les mesures en temps real), si s'edita una variable al *ControlDesk*, és com si es canviés al model de *Simulink* i tot el sistema canvia en conseqüència.

Els gràfics de variables respecte al temps tenen un funcionament una mica més complex. Un cop seleccionada la variable que es vol representar, cal indicar dos paràmetres addicionals, anomenats "*Start Trigger*" i "*Stop Trigger*". Aquests *Triggers* (literalment 'gallets', com en una pistola) són útils quan les variables representen dades no contínues o que es volen representar d'una manera determinada a la vista gràfica: el primer indica sota quina condició el gràfic ha de començar a representar dades, i el segon indica quan s'ha d'aturar la representació. El funcionament és gairebé idèntic al *Trigger* d'un oscil·loscopi.

Per definir aquestes condicions d'inici i final als gràfics, s'han de vincular a uns altres *Triggers*, generals per tot el projecte i amb característiques editables, anomenats "*Platform Trigger*" (indica l'inici i es vincula al *Start Trigger*) i "*Duration Trigger*" (indica el final i es vincula al *Stop Trigger*). Aquesta vinculació es pot fer directament arrossegant des de la barra lateral esquerra fins a la part correcta del gràfic cadascun dels *Triggers*.

L'últim element bàsic del programa són els "*Recorders*", els elements que permeten la captura i gravació de dades en arxius independents, com per exemple un arxiu amb extensió .mat compatible amb *Matlab*. Simplement cal indicar quines variables s'han d'anar registrant, a on es vol desar l'arxiu i definir algunes altres opcions bàsiques del desat. Llavors polsant el botó d'inici de gravació s'inicia la captura de les variables indicades, i s'indica amb una barra vermella a la part inferior de la pantalla, juntament amb el temps de gravació. Al polsar el botó d'inici es crea l'arxiu temporal usat per sincronitzar el programa de l'oscil·loscopi. Quan es desitja aturar la captura, simplement cal polsar el botó d'aturada, i l'arxiu quedarà desat on se li hagi indicat.

Evidentment el programa és molt més complex i, a més de tenir moltes més opcions no mencionades en aquest apartat, permet editar molt més les opcions descrites per adequar-se al que es vol en cada projecte molt millor. Moltes d'aquestes opcions es van haver d'usar en els canvis realitzats al projecte de *ControlDesk* final del convertidor, discutits a l'apartat següent.

3.2.2. Projecte existent i primers canvis

Tant el model de *Simulink* com el projecte de *ControlDesk* associat inicials han sigut creats pel GREP abans de l'inici d'aquest Treball. Tot i això, es van haver de fer algunes modificacions per assegurar el seu correcte funcionament durant les proves del convertidor.

L'aspecte de l'espai de treball inicial el podem veure a la Figura 3.6, on es mostra la primera pestanya, amb el control i vista general, i a la Figura 3.7, amb el control i visualització de les bateries. Des de la primera pestanya s'activa el convertidor, es pot decidir si activar el control de llaç tancat o no, el tipus de control, si treballar amb "duties" constants, canviar el valor de totes les variables de control, càrregues nominals i estats de càrrega (SOC, "State Of Charge", calculat com la càrrega de cada instant entre la nominal) inicials, i visualitzar variables de control, tensions, corrents, SOC's i temperatures en temps real. A la segona pestanya es poden visualitzar també aquests últims valors, tant de forma numèrica com gràfica, i canviar els paràmetres de guany i desplaçament de tots els senyals per poder calibrar els sensors còmodament quan faci falta.

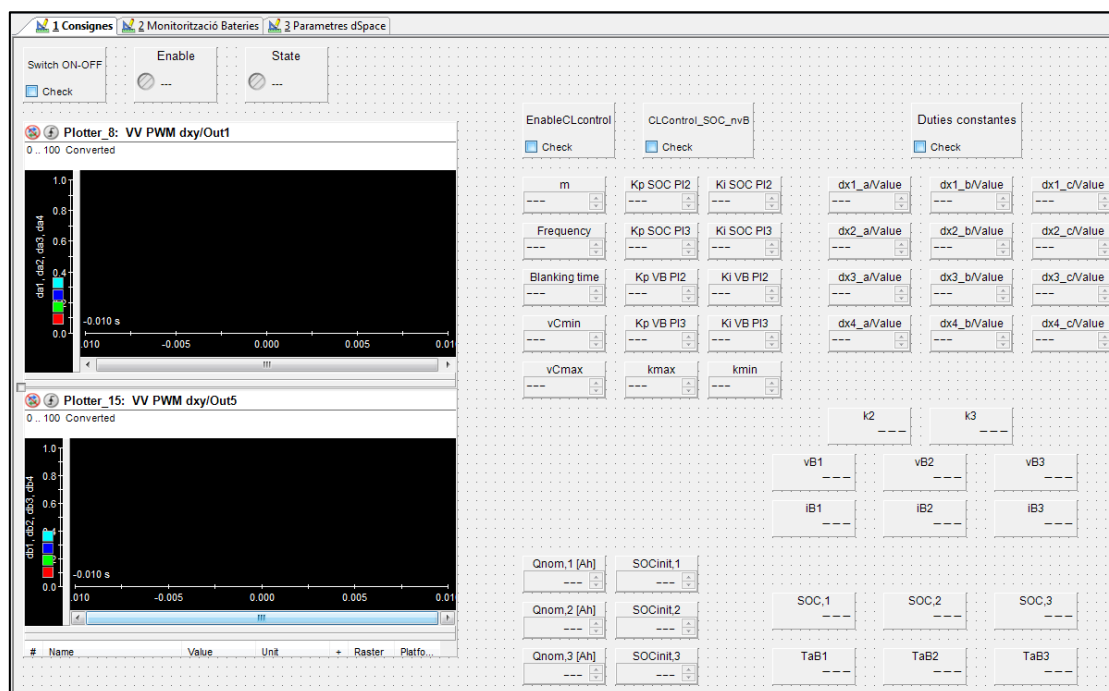


Figura 3.6 – Espai de treball inicial del ControlDesk, pestanya "1. Consignes"

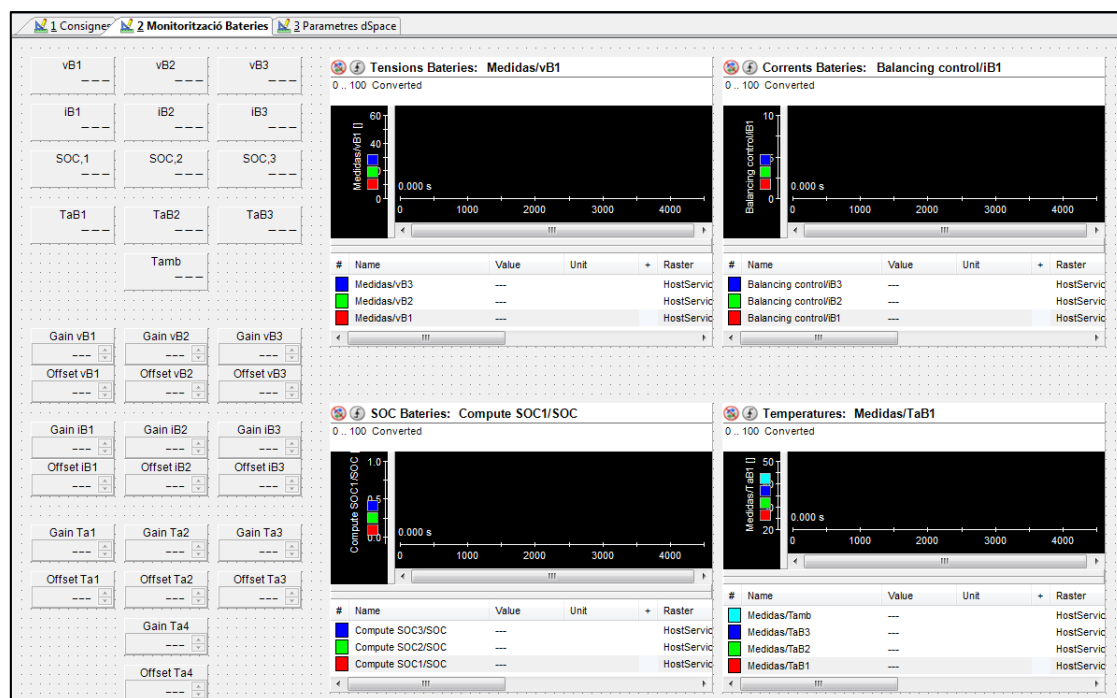


Figura 3.7 – Espai de treball inicial del ControlDesk, pestanya “2. Monitorització Bateries”

Tot i que el model i l’espai de treball funcionaven correctament, durant la duració d’aquest treball es van dur a terme millores per augmentar la seguretat del sistema i reduir les perturbacions. Tots aquests canvis es van fer de forma conjunta amb els membres del GREP.

Primer es van afegir uns blocs al model de *Simulink* per poder detectar si els corrents superaven uns certs llindars o si la diferència entre ells era massa elevada. Si s’arriba a qualsevol d’aquestes situacions, de la mateixa manera que si les tensions no estan dins d’un rang específic, s’atura el convertidor de forma automàtica. Llavors, usant uns biestables, es va aconseguir tenir unes variables que un cop detectada una mesura per fora dels rangs establerts, canviessin de valor de forma permanent. En total es van col·locar nou d’aquestes variables, anomenades “alarmes”: tres per tensió, tres per corrent i tres per diferència de corrent. També es va afegir una variable d’entrada que reiniciés el valor dels biestables. Al *ControlDesk*, es van col·locar indicadors lluminosos per cada una d’aquestes alarmes i una casella per reiniciar-les.

Per altra banda, un cop iniciades les primeres proves i veient el soroll generat pels senyals d’entrada, també es van afegir uns filtres al model de *Simulink* als senyals de corrent per obtenir les variables “average” de cada un dels tres corrents. Tot i que aquests canvis es van realitzar per altres membres del GREP, amb l’autor del treball com a espectador, s’ha considerat necessari mencionar-los per justificar els nous objectes afegits a l’espai de treball del *ControlDesk* per monitoritzar aquestes variables.

Finalment, a la Figura 3.8 es pot observar l'espai de treball final al ControlDesk en marxa (la primera pestanya, on hi ha els canvis notables), però amb el convertidor apagat. Tot i estar fora dels marges de tensió (indicador "Enable" en "WRONG"), les alarmes no han saltat (estan totes verdes) perquè s'acaba d'iniciar el programa i el convertidor no s'ha activat encara.

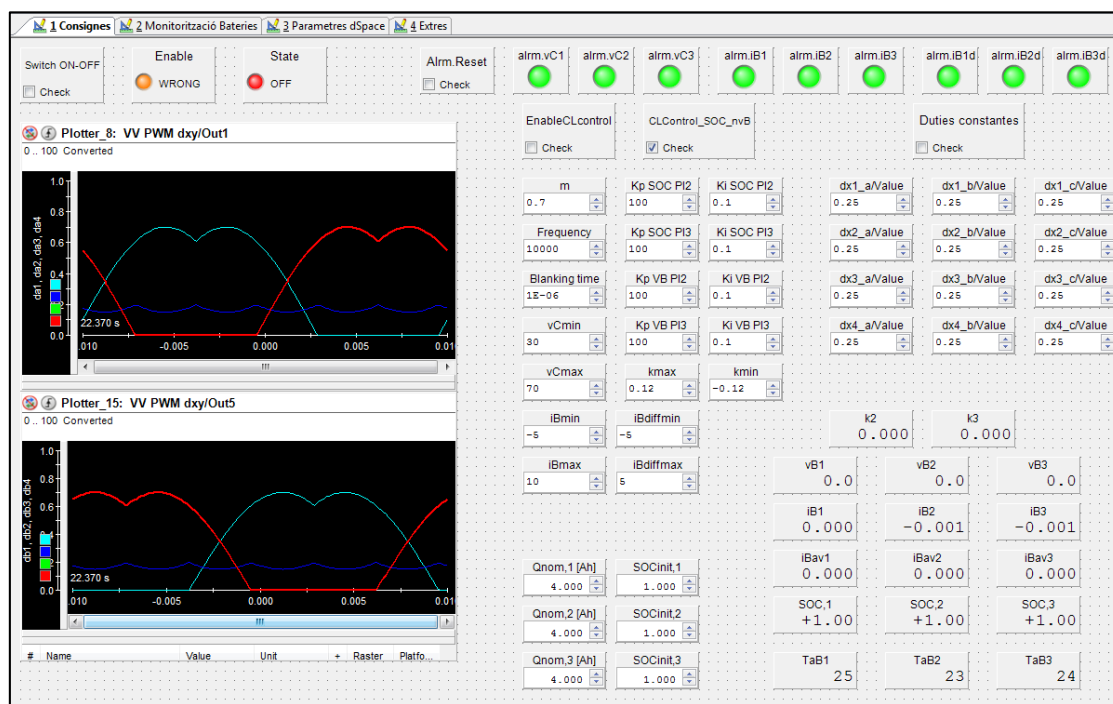


Figura 3.8 – Espai de treball final del ControlDesk amb les mesures en temps real activades

3.2.3. Modificacions finals per la captura de dades

El projecte de *ControlDesk* s'utilitza, a més de per controlar el convertidor i comprovar el seu funcionament, per recollir les dades de la part de contínua provinents dels sensors i poder-les desar en fitxers separats per tractar-les posteriorment.

Per les propietats del model de *Simulink*, el programa pren mesures amb una freqüència de 10 kHz, és a dir, amb un període de mostreig de 0,0001 segons. En les proves del convertidor, que duren aproximadament una hora, es tindrien uns 36 milions de mostres per cada variable enregistrada en el "Recorder", i entre totes les variables a registrar es podrien arribar als 500 milions de dades per prova. Totes aquestes dades s'han de desar en fitxers de *Matlab* i tractar posteriorment, així que sembla raonable disminuir la freqüència de mostreig per evitar aquesta quantitat immensa de dades i fitxers de mides gegants.

Llegint la documentació de *ControlDesk* [5], es va trobar que la manera més senzilla de reduir la freqüència de mostreig és creant un nou "Raster" i canviant l'opció "Downsampling".

Els *Rasters* agrupen una parella de *Platform* i *Duration Triggers*, i és el que realment es vincula als gràfics de l'espai de treball al arrossegar-hi els *Triggers*. De fet, totes les variables usades en la mesura (icona groga) i/o en la visualització (icona vermella) dins l'espai de treball es poden associar a un o més *Rasters* per veure-les i gravar-les amb paràmetres diferents. Per defecte, totes les variables estan associades a l'únic *Raster* actiu anomenat "Host Service".

Per crear un nou *Raster* amb el temps de mostreig desitjat, només cal fer clic amb el botó dret a *Host Service*, i seleccionar "Add Additional Raster". A l'arbre d'objectes haurà aparegut un nou element a la mateixa alçada que *Host Service*, amb dos elements buits a dins. Són els forats per col·locar els *Triggers* corresponents. Per crear un nou *Platform Trigger* només cal fer clic dret al punt "Platform" dins de l'apartat *Triggers* de l'arbre, i seleccionar "Add New Duration Trigger". Crear un nou *Duration Trigger* es fa de forma anàloga amb l'element "Duration Triggers". Aquests nous elements es poden configurar com es vulgui, per exemple, el *Duration Trigger* tindrà una durada de 4500 segons per assegurar que es visualitzin totes les dades en una prova que duri més d'una hora. Un cop creats només cal arrossegar cada *Trigger* al seu espai del nou *Raster*.

Clicant el nou *Raster*, apareix a la barra lateral dreta la llista amb les seves propietats. Per començar, es pot canviar el nom al que es desitgi, però la opció important és "Downsampling". El nombre significa el factor pel qual es multiplica el període de mostreig que es mostra a "Sampling Period" per obtenir el període de mostreig final de les variables. Es va decidir que visualitzar i gravar una dada per segon a cada variable era suficient, i per tant el factor és de 10000.

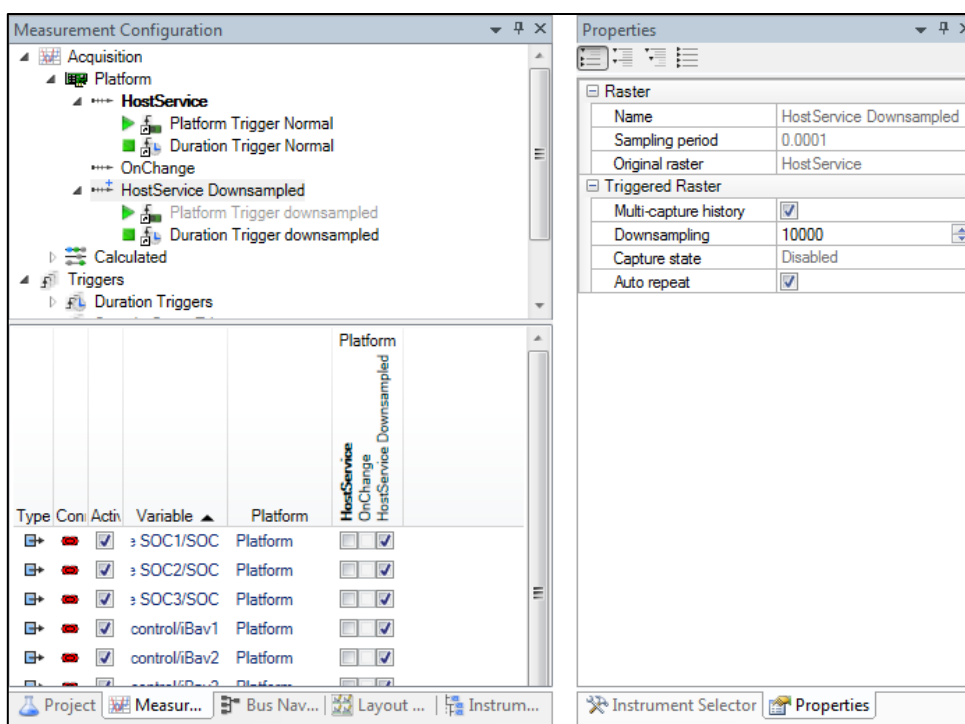


Figura 3.9 – Barres laterals del ControlDesk en la configuració d'un nou Raster

Per assignar les variables als *Rasters* pertinents, s'ha de fer clic a "*Platform*", a la part superior de l'arbre, i llavors apareixerà una taula amb totes les variables i *Rasters* disponibles just a sota, a la barra lateral esquerra. Per assignar un sol *Raster* a una variable, només cal fer clic a la casella de la columna pertinent. Si es vol assignar una variable a més d'un *Raster*, que també es possible, s'ha de mantenir polsada la tecla *Ctrl* i fer clic en les caselles que es vulgui. A la Figura 3.9 es poden veure les barres laterals esquerra i dreta, amb l'arbre d'objectes, els dos *Rasters* actius, les propietats del "*Raster Downsampled*" i un tros de la taula de variables amb les caselles pertinents marcades.

Ja que es tenien els nous *Triggers* i les variables s'han de gravar a una mostra per segon, es va canviar la configuració dels gràfics de tensions, corrents, SOCs i temperatures de la segona pestanya de l'espai de treball perquè es visualitzessin les dades amb aquest nou *Raster*. Per no perdre informació i per comprovar el soroll dels senyals en temps real, es va afegir una quarta pestanya, "*4. Extres*", amb gràfics de tensió i corrent associats al *Raster* original, tal i com es pot veure a la Figura 3.10.

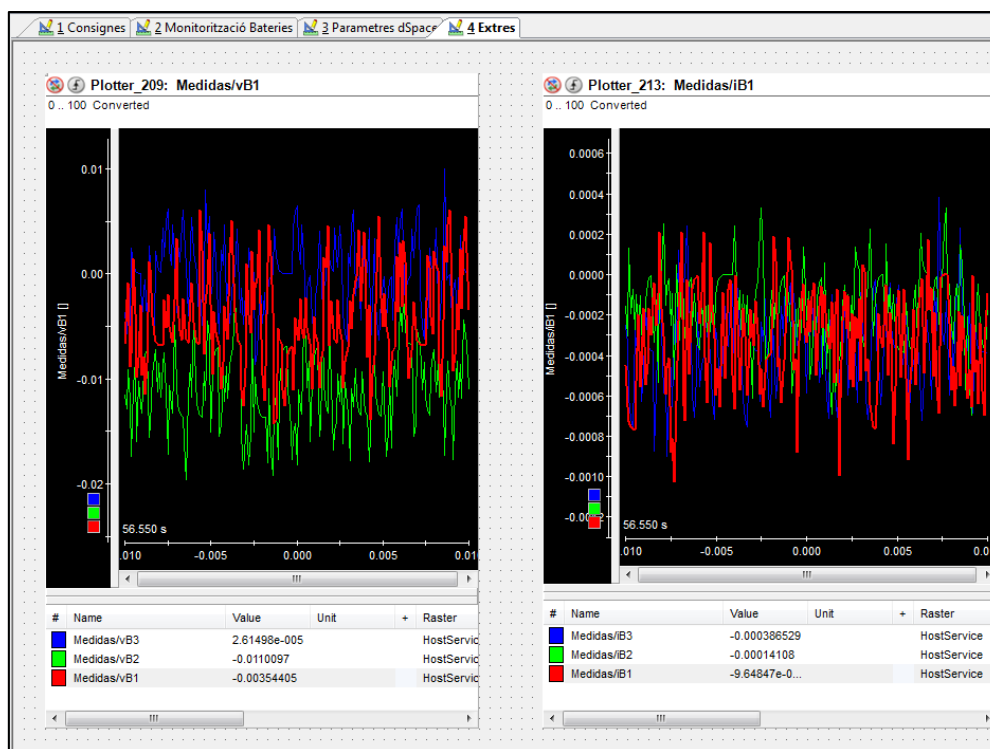


Figura 3.10 – Pestanya "4. Extres" de l'espai de treball final

L'últim pas per tenir el projecte de *ControlDesk* totalment preparat per la captura de dades de les proves amb el convertidor és configurar el *Recorder* perquè desitgi les dades desitjades en un fitxer *.mat* compatible amb *Matlab*.

Com s'ha descrit al punt de funcionament bàsic, només cal afegir un *Recorder* fent clic dret a "Recorder" i seleccionar "Create New Recorder". Llavors s'han d'incloure totes les variables que es vulguin desar a l'iniciar la gravació dins del *Recorder*, acció tan fàcil com arrossegar-les des del seu menú fins el requadre del nou *Recorder*.

Les variables apareixeran en una taula similar a la que es veia al fer clic sobre "Platform", però ara les columnes de *Raster* serveixen per establir amb quina freqüència es desen les dades. En aquesta taula, que podem veure a la Figura 3.11, només es poden seleccionar *Rasters* que estiguin assignats a cada variable prèviament, per exemple, es podrien gravar les tensions (tres últimes variables) en el *Raster* original i en el de captura lenta (per seleccionar varis *Rasters* s'ha de prémer *Ctrl*), però com s'ha raonat totes les variables es capturaran a una mostra per segon.

Type	Con	Acti	Reo	Variable	Platform	HostService OnChange	HostService Downsampled
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	odel Root/Balancing control/iBav1	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	odel Root/Balancing control/iBav2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	odel Root/Balancing control/iBav3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	xdel Root/Balancing control/SOC1	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	xdel Root/Balancing control/SOC2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	xdel Root/Balancing control/SOC3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/k2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/k3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/iB1	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/iB2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/iB3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/TaB1	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/TaB2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/TaB3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/Tamb	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/vB1	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/vB2	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Model Root/Medidas/vB3	Platform	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.11 – Taula de variables que grava el ControlDesk

Les propietats del *Recorder* a la barra lateral dreta només cal editar-les un cop. Per exemple, cal definir que s'exportin les dades en un fitxer .mat de forma automàtica, amb un prefix comú ("exp1_") i a quin directori desar el fitxer. I amb això ja tenim el programa llest.

3.3. Captura d'imatge tèrmica

La tercera i última font d'entrada de dades a automatitzar és la càmera tèrmica, concretament una *Keysight U5855A*, una càmera que capta ones infraroges i tradueix la lectura a una imatge en color de 320x240 píxels amb escala de temperatures.

Al capturar imatges amb la càmera (prement el gallet), es desen a la targeta de memòria SD introduïda en arxius amb extensió *.ttr*, que contenen totes les dades de temperatura a dins, no sols l'aspecte de la imatge. A l'ordinador, aquestes imatges només es poden obrir i visualitzar correctament amb el programa del mateix distribuïdor, "*TrueIR Analysis and Reporting Tool*", que ja estava instal·lat al laboratori.

La càmera consta d'un port USB per connectar-la a l'ordinador, però a priori l'ordinador només detecta el dispositiu com una memòria externa, a la que es pot entrar amb l'explorador i veure-hi els fitxers continguts, és a dir, és com connectar la targeta SD directament, es pot veure el contingut però no controlar el funcionament del dispositiu pròpiament dit.

Calia buscar si hi havia alguna possibilitat de programar la càmera perquè realitzés captures cada cert temps (d'una forma similar a la programació de captures de pantalla de l'oscil·loscopi) o, com a mínim, poder-la controlar des de l'ordinador. Llegint el full de dades de referència de la càmera [6], es va poder veure que el programa oficial "*TrueIR Analysis and Reporting Tool*" també permet la transmissió directa de dades mitjançant el cable USB a la pantalla de l'ordinador, així com el control directe sobre la càmera amb una pestanya especial.

Malauradament, això no succeïa en connectar la càmera a l'ordinador, així que s'havia de buscar el motiu. El programa a l'ordinador estava actualitzat a la versió més actual, i la càmera és d'un dels models que permeten aquestes funcions, per tant la única opció era que el *firmware* de la pròpia càmera no estigués actualitzat. Efectivament, la versió instal·lada era la 1.1, i en el menú d'opcions de la càmera no apareixia cap opció de transmissió de dades, ja que aquesta opció es va incorporar a la versió 1.3, tal com es pot veure a l'historial de versions d'aquest *firmware* [7].

A la pàgina web oficial de Keysight Technologies, buscant pel model exacte i anant a l'apartat de suport tècnic, es pot trobar la pàgina per descarregar la versió més actual del *firmware* per la càmera tèrmica desitjada, i també els passos a seguir per instal·lar correctament aquesta versió al dispositiu.

Els requeriments són senzills: el fitxer d'actualització, la càmera, el seu carregador, una targeta de memòria SD i un ordinador que pugui llegir aquest tipus de targetes.

Per actualitzar el firmware només cal copiar el fitxer d'actualització dins de la targeta, dins d'un directori nou anomenat "Update" (connectant la targeta a l'ordinador, no obrint els continguts connectant la càmera a l'ordinador via cable USB), i llavors, amb la càmera apagada i el carregador connectat, introduir-hi la targeta SD. Arribats a aquest punt només cal encendre la càmera mentre es polsa el botó de "Càmera/Zoom" i el gallet alhora amb el botó d'engegada, fins que aparegui el missatge d'actualització. Llavors es poden deixar anar els botons i esperar a que s'actualitzi el *firmware*, vigilat de no desconnectar el cable d'alimentació ni retirar la targeta SD. Un cop finalitzi l'actualització, la càmera es pot apagar un altre cop, i al tornar-se a encendre, s'hauria de veure a la pantalla d'inici la nova versió, juntament amb les noves opcions quan s'obre el menú. Seguint aquests passos senzills descrits pel fabricant [8], es va poder actualitzar correctament la càmera i al menú ja apareixia l'opció de transmetre dades a l'ordinador.

Ara, al seleccionar aquesta opció ("Stream") en el menú de la càmera i connectar-la amb el cable USB, al programa "TrueIR Analysis and Reporting Tool" apareix una nova pestanya addicional, "Camera", que com es veu a la Figura 3.12 mostra en temps real la imatge vista per pantalla a la càmera, a més de les opcions de configuració més importants que també es poden trobar al menú de la càmera tèrmica, com el rang de temperatures o la distància a l'objecte. Mentre la càmera transmet dades a l'ordinador, totes aquestes opcions només es poden canviar amb el programa, el menú de la càmera queda totalment inutilitzat.

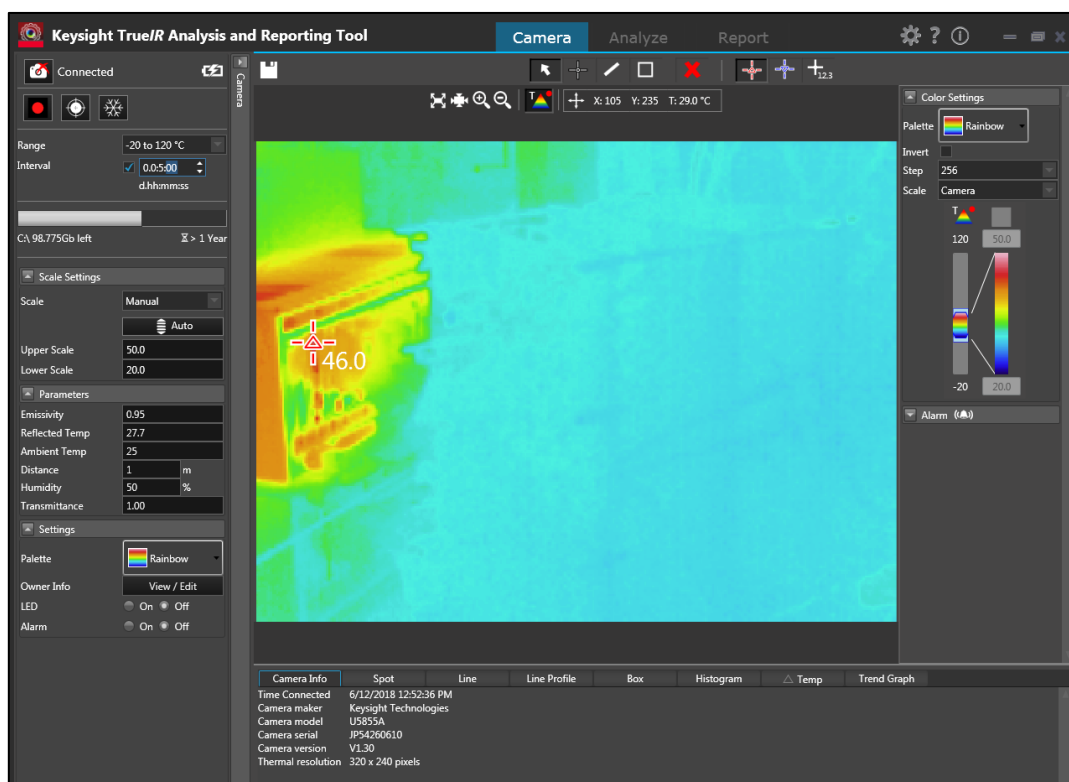


Figura 3.12 – Pantalla "Camera" del programa "TrueIR Analysis and Reporting Tool"

A més, si bé sembla que no és possible programar la captura des de *Matlab* i tenir les tres entrades de dades sincronitzades, aquesta pestanya del programa també permet la captura d'imatges i vídeos desant-los al directori indicat. L'opció per defecte per gravar un vídeo és seleccionar els fotogrames per segon (FPS) que es volen capturar, però seleccionant la casella "Interval", es pot indicar el temps entre fotogrames consecutius, entre un segon i un dia. Així doncs, per les proves es pot posar que capturi una imatge cada cinc minuts i es tindran les mateixes imatges tèrmiques que captures de pantalla de l'oscil·loscopi. Com les temperatures no canvien de cop i les inèrcies tèrmiques són elevades, aquest lapse de temps entre captures és totalment raonable.

Per tant, finalment, col·locant la càmera amb un trípode de manera que es pugui veure de forma correcta el convertidor a una distància prudent, i connectant-la amb un cable USB a l'ordinador amb el mode de transmissió de dades activat, només cal obrir el programa de *Keysight*, establir el temps entre captures i prémer el botó d'enregistrar per tenir captures de les imatges tèrmiques durant les proves. La captura de dades de la càmera tèrmica no està sincronitzada amb les altres dues, però donada la freqüència de captura durant les proves (una cada cinc minuts) i el temps de càrrega entre que es prem el botó i s'inicia la captura, l'error no és apreciable ni molt menys afecta als resultats experimentals, ja que les captures d'imatges tèrmiques son informació addicional per veure si algun element s'escalfa més del normal o si hi ha alguna anomalia.

Així doncs, per iniciar la captura de totes les dades necessàries per fer una prova completa amb el convertidor de forma correcta, cal, primer, obrir el *Matlab*, el *ControlDesk* i el programa "*TrueIR Analysis and Reporting Tool*", i llavors:

- Executar el programa de *Matlab* de captures de l'oscil·loscopi i configurar els paràmetres del panell de control, si cal.
- Obrir el projecte de *ControlDesk*, editar els paràmetres que faci falta i iniciar les mesures en temps real.
- Iniciar la gravació de la càmera tèrmica amb la configuració correcta.
- Prémer el botó verd d'iniciar captura al panell de control sense seleccionar "*inicia immediatament*", per iniciar un temps d'escaneig.
- Començar la gravació de dades des del *ControlDesk* abans no s'acabi aquest temps per tal que s'iniciïn les captures dels dos programes de forma sincronitzada.

4. Tasques de suport

Per tal de poder realitzar les proves amb el convertidor no només feia falta automatitzar les captures de dades com s'ha descrit al capítol anterior, sinó que també era necessari posar a punt el propi banc de proves, realitzant tasques com connectar i soldar els cables per on arriben els senyals de control, distribuir l'espai de treball, realitzar totes les connexions i altres feines de suport per tenir el convertidor a punt.

Un cop enllestides totes aquestes tasques de preparació, calia dur a terme les proves del convertidor, encenent els aparells necessaris, fent les connexions pertinents, iniciant les captures de la manera correcta, i supervisant-ho tot durant les pròpies proves atentament perquè tot funcionés correctament, i en cas que calgués (si es produís algun error o fallés algun component), aturar el sistema ràpidament per evitar danys majors.

Aquest capítol està dividit en dos apartats, corresponents a aquestes dues tasques diferenciades que s'han realitzat: preparació i conducció de les proves.

4.1. Preparació del banc de proves

Les tasques de preparació del banc de proves perquè tot estigués a punt i fos possible fer les proves van ser diverses i repartides aproximadament durant un mes i mig començant dues setmanes després de l'inici del treball (entre el març i l'abril de 2018). Un cop iniciades les proves, també es van haver de realitzar modificacions i millores, com es descriu en aquest apartat. Els membres del GREP també anaven fent altres tasques, però no es descriuran les tasques en les que l'autor no hagi participat de forma activa. Com les tasques són bastant independents entre elles, es descriuen en apartats separats a continuació, per facilitar la seva distinció.

4.1.1. Preparació dels cables de senyal

La primera tasca de suport realitzada va ser la preparació dels cables que connecten la *dSpace* amb les plaques del convertidor, i per on s'envien els senyals de control pels interruptors. Cada placa del convertidor té el seu cable que prové d'una placa diferent de la *dSpace*, per tant, hi haurà tres cables idèntics, un per placa, o dit d'una altra manera, un per cada fase del corrent trifàsic de sortida del convertidor.

Com es pot observar, més de la meitat dels cables sortints dels connectors IDC20 van a un GND comú (cada connector rep els senyals de 9 interruptors, que necessiten terminal positiu i negatiu. Els dos pins restants també es connecten a GND per evitar errors), i dels altres pins hi ha quatre parelles de cables que comparteixen senyal de control. Al connector DB37, de fet, per com està connectada la placa de la *dSpace* [9], també més de la meitat dels pins (de l'1 al 19 i el 36) estan connectats a un GND comú, per tant no cal unir tots els cables en un mateix pin sinó que es poden repartir. La distribució final dels cables als pins del connector DB37 es pot veure a la Figura 4.2, on s'han marcat en vermell els pins on entren dos cables, en verd els pins usats pels cables de sincronisme i en blanc els pins que es van deixar a l'aire. El pin 37, que correspon a una entrada de Reset, es va connectar al GND per evitar possibles activacions degudes al soroll.

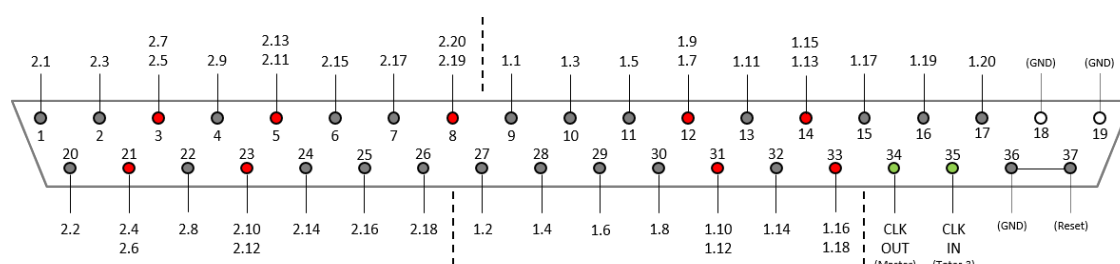


Figura 4.2 – Esquema de connexions als terminals DB37

Com s'ha mencionat, per elaborar aquests cables es van fer servir dos cables plans de 20 conductors per cada fase, un per cada connector IDC20 de les plaques. Per tal que no faltés ni sobrés massa material, es van tallar els cables un a un a la distància que havien de salvar entre *dSpace* i convertidor, i el cable corresponent al connector P2 resultà més curt que el de P1 per cada una de les fases. A la Figura 4.3 es pot observar el procés dut a terme per soldar els cables individuals als pins del connector DB37, i en especial les parelles de cables entrelligades que van a un mateix pin.

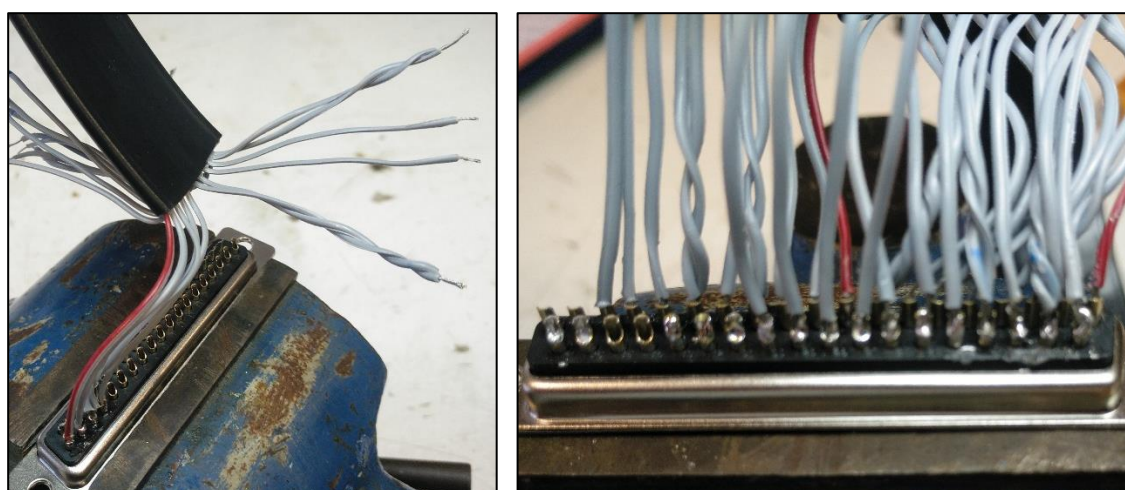


Figura 4.3 – Fotografies del procés de soldat dels cables plans al connector DB37

Un cop fetes totes les connexions dels cables de control, s'han de connectar els cables per sincronitzar els senyals entre fases. Al connector DB37 de la fase A, que és la "Master", del pin 34 ("CLK Out") es genera el senyal de sincronisme, que cal connectar als pins 35 ("CLK In") de totes tres fases. Per tant, a la fase A els pins 34 i 35 estan connectats entre sí directament, i d'aquí en surt un cable coaxial que va al pin 35 de la fase B, on s'uneix amb un altre cable coaxial que va fins el pin 35 de la fase C. Tots aquests cables coaxials tenen el conductor intern, que es connecta als pins, i la pantalla externa que fa de protecció, que juntament amb la pantalla dels cables plans, es connecta a les carcasses dels connectors DB37.

Finalment, es col·loquen els embellidors als connectors DB37, es pincen els cables als connectors IDC20 i s'hi afegeix l'element de protecció "Strain Relief" que evita que la connexió pateixi si es tiba el cable. A la Figura 4.4 es poden veure aquests cables completament muntats.



Figura 4.4 – Cables pels senyals de control acabats

4.1.2. Reparacions i correcció dels llaços de massa

Durant les primeres proves del convertidor, un cop s'havia comprovat que funcionava el control amb una sola fase (una placa), al fer proves amb dues o tres plaques les alarmes saltaven, tots els LEDs vermells s'encenien i fins i tot alguns MOSFETs es van espallar.

Després d'alguns canvis als cables de sincronisme, perquè es pensava que el problema venia del soroll en aquests senyals, es va descobrir que el problema era molt més greu, però per sort fàcil de solucionar: hi havia uns llaços de massa molt importants al sistema, concretament entre la font d'alimentació dels interruptors, les plaques i la *dSpace*.

De fet, també hi ha uns petits llaços de massa formats pels senyals de sincronisme i la *dSpace*, que es podrien reduir escurçant els cables, fent que la placa central fos la *Master* i entrellaçant el cable de senyal amb un cable connectat als GND de les diferents plaques, per fer a la pràctica un senyal en mode diferencial.

Degut a les fallades provocades pels llaços de massa, tot i tenir proteccions, alguns MOSFETs van patir les conseqüències i es van espavillar. Per seguir amb el projecte calia substituir-los per uns de nous.

Els MOSFETs estan situats a la part de sota de les plaques. De fet, amb el convertidor totalment muntat gairebé no es veuen, ja que les plaques d'interruptors estan muntades sobre unes altres plaques més grans on estan les connexions pels diferents nivells de tensió contínua i la sortida d'alterna. A la Figura 4.6 es pot veure un detall del convertidor totalment muntat vist des de sota, i com la placa inferior té unes petites finestres per on es veu la placa superior, on estan soldats els transistors. També s'inclou un detall d'un MOSFET de potència.

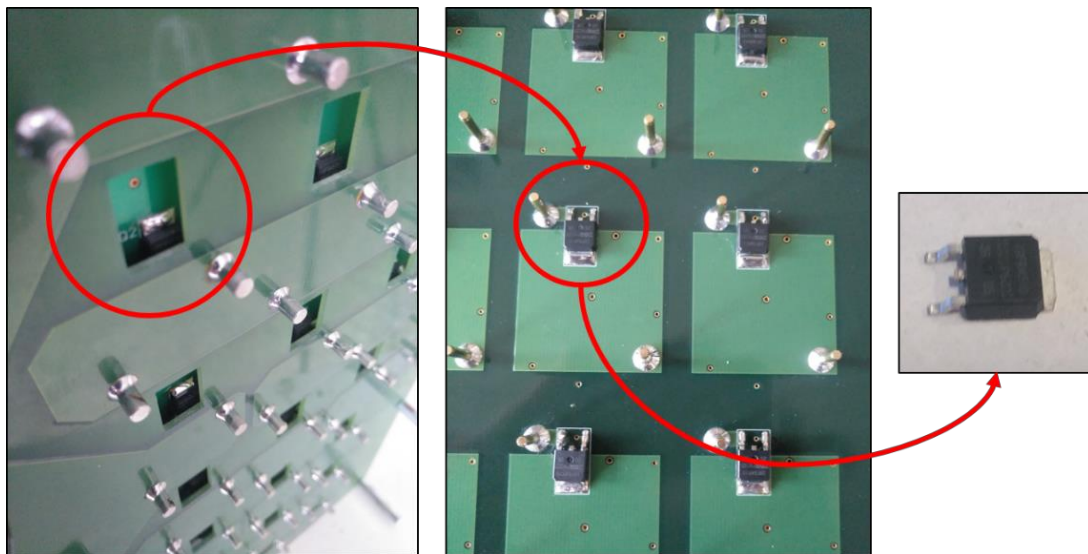


Figura 4.6 – Detall dels MOSFETs al convertidor

Per reparar els danys, primer cal comprovar quins transistors han deixat de funcionar, i llavors, un cop separada la placa petita de l'estructura del convertidor, retirar la soldadura a les tres potes (drenador, sortidor i porta) del MOSFET espavillat i soldar un nou transistor al seu lloc.

4.1.3. Elaboració dels cables d'alimentació

Al canviar d'una sola font de tensió a tres de diferents, i apilar-les una sobre l'altra, hi ha més distància entre el convertidor i les fonts noves, i els cables d'alimentació existents no eren prou llargs. Per salvar la nova distància es van confeccionar dos cables nous per alimentar les cel·les del convertidor, formats per un cable coaxial amb dos cables a dins, amb un extrem acabat en connectors banana mascles (un vermell i un negre) i l'altre acabat amb el connector femella blanc per pins de plaques de circuit imprès que podem veure a la Figura 4.7 (mascle a la placa).

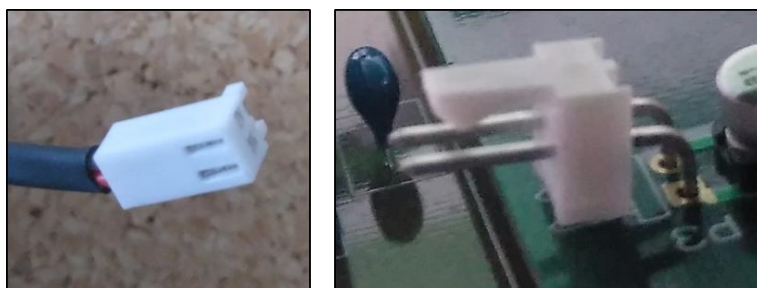


Figura 4.7 – Connectors mascle i femella d'alimentació de la placa

En ambdós tipus de connectors no cal cap soldadura, només fer pressió i cargolar en el cas dels connectors banana. També es van afegir talls de material termoretràctil, un plàstic que es contrau al aplicar-hi calor, per recobrir les parts de conductor que quedaren al descobert i evitar curtcircuits. Un dels cables finals es pot veure a la Figura 4.8.



Figura 4.8 – Cables d'alimentació de les plaques

4.1.4. Addició d'elements a les plaques

Un cop arreglats els llaços de massa i tots els elements que s'havien espatllat o ja no servien, es va detectar que per la modulació emprada al convertidor, hi havia certs interruptors que romanien en el mateix estat durant un temps massa prolongat i això feia descarregar els condensadors de les seves respectives cel·les.

Per evitar-ho, es van soldar tres cables vermells curts per placa entre els condensadors indicats pels membres del GREP, i també dos díodes entre els condensadors indicats per placa. A la Figura 4.9 es poden observar aquestes addicions en detall a la part esquerra i la vista final d'una placa del convertidor a la dreta.

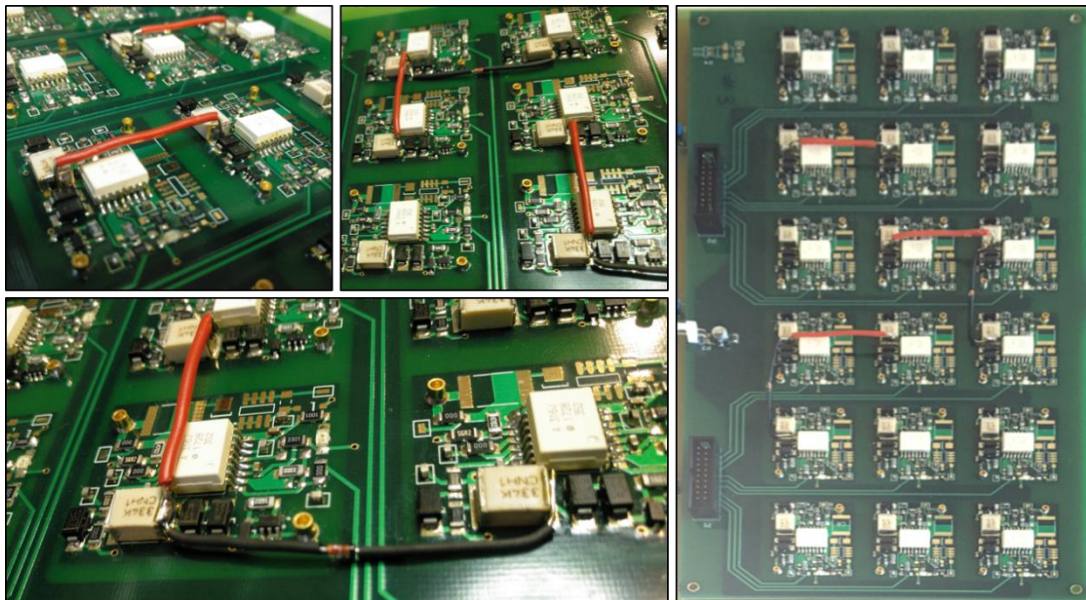


Figura 4.9 – Detalls dels cables i díodes afegits, i vista general d'una placa

4.1.5. Inserció de filtres

Un cop iniciades les proves, es va poder observar que en les mesures de tensió i corrent provinents dels sensors a la part de contínua hi havia uns pics molt importants, deguts al soroll. Aquests pics podien fer saltar les alarmes establides de protecció al *ControlDesk*, ja que feien superar els llindars marcats encara que fos un temps imperceptible, i s'havien de minimitzar.

Per aconseguir-ho, es va procedir a afegir un seguit de filtres, tant digitals al model de *Simulink* com analògics en forma de condensadors als sensors, assegurant que es reduïa el soroll però sense disminuir massa la freqüència de mostreig, ja que es necessita un mínim perquè el control actuï correctament.

4.1.6. Connexió d'un interruptor general

Per tal de poder connectar i desconnectar de forma senzilla i ràpida el convertidor de les bateries, es va afegir un interruptor general entre la torre de sensors i les bateries, tant per poder desconnectar ràpidament el convertidor si es produeix algun error, com per poder connectar els cables de la torre de sensors i les bateries sense que el convertidor rebi immediatament la tensió.

De fet, degut als condensadors del bus de CC, es van haver de col·locar dos interruptors, tal i com es veu a la Figura 4.10, afegint unes resistències de 100 Ω en paral·lel al segon per tal d'evitar els pics de corrent al connectar el convertidor. A l'hora de connectar, primer s'ha de tancar l'interruptor 1, que tanca el circuit passant per les resistències, reduint així el pic de corrent, i quan els condensadors estan prou carregats, llavors es pot tancar l'interruptor 2 que curtcircuita les resistències. A la Figura 4.11 es pot veure el muntatge final dels interruptors, a l'esquerra l'interruptor 2 amb les tres resistències en paral·lel visibles, i a la dreta els dos interruptors col·locats al banc de proves i numerats per tal d'evitar possibles errors a l'hora d'iniciar les proves.

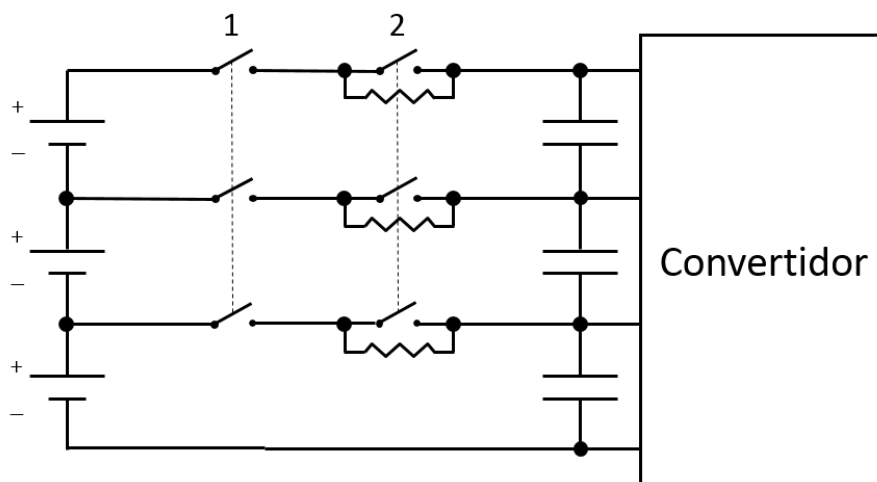


Figura 4.10 – Esquema elèctric de la part de contínua amb els nous interruptors

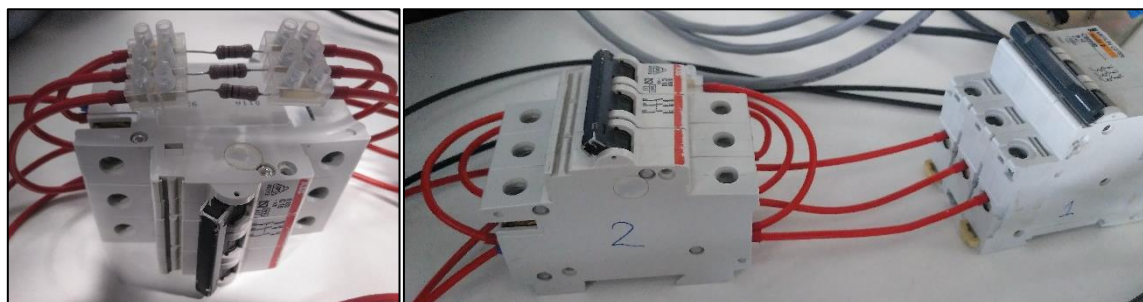


Figura 4.11 – Muntatge dels interruptors i col·locació

4.1.7. Distribució de l'espai

Un cop acabades les proves inicials per comprovar que tot funcionava correctament, i fets els canvis descrits en els punts anteriors, es van haver de redistribuir tots els elements del banc de proves per tal de poder-ho connectar tot correctament, sense masses creuaments de cables i de forma que les desconexions i canvis entre proves fossin el més ràpid possible.

Primer es va haver de girar el convertidor i posar-lo en vertical, i separar les plaques del convertidor per poder veure millor els transistors des de la càmera tèrmica, que es va fixar en un tríode marcant a terra el lloc des d'on es tenia el millor angle.

Llavors es va moure la torre de sensors a darrere de la taula, en un lloc on no es confongués amb el convertidor des de la càmera tèrmica i estigués en un punt intermedi entre les bateries i el convertidor.

Fins aquest punt les proves s'havien realitzat amb fonts de tensió de corrent continu independents, per tant calia comprovar que els cables eren prou llargs i es tenien suficients connectors per tots els sensors i aparells a unir. Les bateries es van col·locar amb la seva caixa al fons de la taula, en un punt on era fàcil desconectar-les dels sensors i de tota la resta del circuit, i connectar-les als carregadors entre proves.

Els interruptors es van col·locar entre els sensors i el convertidor, al seu lloc natural seguint l'esquema elèctric, just darrere de la dSpace, el més a prop possible de l'ordinador i del seient per poder-hi accedir ràpidament si hi hagués cap fallida. Els nombres es van deixar ben visibles per recordar sempre connectar primer amb les resistències i després curtcircuitar-les.

La càrrega de la part d'alterna no es va haver de moure, les bobines es deixaren just al costat del convertidor sobre la taula i les resistències en forma d'estufa a terra.

El que sí es va haver de canviar van ser les sondes de l'oscil·loscopi, per col·locar-les al seu lloc definitiu formant una connexió Aron amb dos voltímetres i dos amperímetres, i passant els cables per darrere de les fonts de tensió que alimenten sensors i convertidor.

També es va haver de canviar de lloc la placa de connexions de cables BNC d'entrada a la *dSpace*, on arriben els cables amb les mesures de tensió i corrent dels sensors de la part de contínua. Es va veure que ocupava massa espai a la part inferior de la taula i que impedia una bona organització, i es va pujar a la part superior permetent una distribució molt més còmoda. A més, es van afegir els sensors de temperatura, connectant a la placa corresponent els cables provinents de les bateries, l'alimentació de 5V, i els cables de senyal cap a la placa de la *dSpace*.

4.1.8. Substitució dels cables dels sensors

Un cop realitzades la majoria de les proves, i degut al soroll captat pels cables provinents de la torre de sensors, es va decidir canviar tots els cables que connecten tant els sensors de tensió i corrent de la part de contínua amb la placa de connexions de la *dSpace* com els provinents dels sensors de temperatura a mode diferencial.

Aquest canvi augmenta la protecció contra el soroll, ja que la mesura final és el resultat de la diferència dels senyals entre dos cables que segueixen el mateix camí i per tant rebran les mateixes interferències electromagnètiques, que s'anul·laran al restar. Els nous cables necessiten una referència comuna, el AGND (terra analògic), que es connecta a la referència de la torre de sensors i a totes les carcasses dels connectors BNC, com es pot veure a la Figura 4.14.

A la Figura 4.15 es pot observar la nova configuració a la placa de connexions de la *dSpace*, on s'han canviat els selectores al mode "differential" (abans estaven amb "single ended") i de tots 10 cables grisos provinents dels sensors surt un petit cable verd que es connecta al AGND, d'on també surt un cable negre que es connecta a la referència de la torre de sensors. Tots els cables es van numerar a ambdós extrems per poder-los distingir fàcilment si s'entrelliguen.

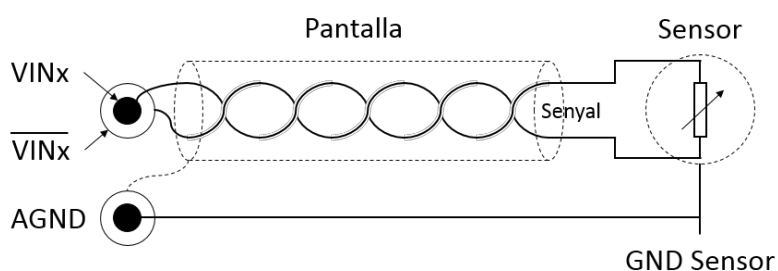


Figura 4.14 – Esquema de les noves connexions entre sensors i la placa DS2004 de la *dSpace*

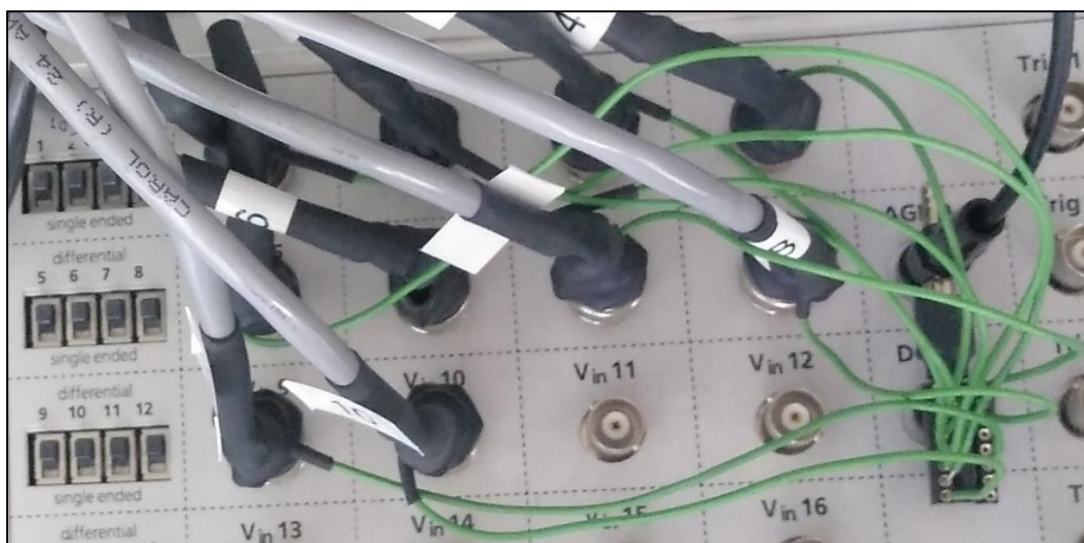


Figura 4.15 – Nova configuració dels cables provinents dels sensors

4.2. Conducció de les proves

Un cop preparat el banc de proves amb tot el necessari, es van començar a realitzar les proves. Progressivament, a mesura que avançaven les proves, l'autor va passar de tenir un rol de suport al costat d'un membre del GREP, a conduir les proves de forma gairebé autònoma.

Les proves es van planificar en detall des de l'inici per tenir una guia i una idea del temps que es trigaria a realitzar-les. Aquesta planificació, dividida en fases, és la que s'explica en l'apartat actual, dividit en diferents punts corresponents a aquestes fases de proves de caràcter diferent.

4.2.1. Proves prèvies amb fonts de CC independents

Per començar, un cop elaborats els cables necessaris per connectar el convertidor, es va procedir a provar-lo, primer amb una placa aïllada, només alimentant les cel·les del convertidor amb les fonts de 5 V per comprovar que el control funcionava i que no hi havia cap problema.

Un cop comprovat el funcionament dels senyals de control, es va procedir a connectar una placa a tres fonts de tensió de corrent continu independents, que es poden veure a la Figura 4.16, per generar els quatre nivells de tensió de la part de contínua del convertidor (0, 50, 100 i 150V). En aquest pas tant els senyals de control com les tensions de sortida van resultar com s'esperava, per totes tres plaques provades d'una en una.



Figura 4.16 – Fonts de tensió emprades a les primeres proves

El següent pas va ser provar amb més d'una placa alhora, i en aquest punt van començar els problemes. Provant amb qualsevol parella de plaques, totes les alarmes saltaven, els LEDs vermells s'encenien i el convertidor s'aturava. Es va pensar que eren els senyals de sincronisme, que podien patir els efectes del soroll, però finalment, com s'ha comentat a l'apartat anterior, es va descobrir que el problema eren els llaços de massa formats al connectar dues o més plaques a la mateixa font de tensió per alimentar els interruptors. Un cop fetes les reparacions pertinents descrites anteriorment, es va procedir amb l'experimentació.

Amb el problema resolt, es va poder seguir amb la planificació d'aquesta primera fase de les proves del convertidor, muntant-lo del tot i connectant totes tres plaques:

- Provar el convertidor trifàsic sense control (llaç obert) i sense càrrega.
- Provar el convertidor trifàsic en llaç obert i amb càrrega RL, comprovant que el sistema funciona correctament en el rang de tensions de 35 a 55 V.
- Provar el convertidor trifàsic en llaç tancat (amb el control activat) i amb càrrega RL, primer amb les tensions de les fonts iguals, i després provant a canviar-les.

Totes les proves van donar els resultats esperats, no va tornar a saltar cap alarma ni a fallar cap component, i en la tercera prova, que era l'hora de la veritat per comprovar el funcionament del control amb el convertidor sencer, es va veure com al reduir la tensió d'una font, s'activava l'acció de control fent disminuir el corrent sortint de la font amb menys tensió i augmentant el corrent de les altres dues, així com, si es feia l'acció contrària i s'augmentava la tensió proporcionada per una de les fonts, el seu corrent augmentava i el de les altres dues disminuïa. Amb les fonts no té cap efecte, però al connectar bateries aquest control fa que a la que genera menys tensió (la menys carregada) se li extregui menys corrent i per tant es descarregui més lentament, fins aconseguir que totes tres bateries s'igualin.

4.2.2. Proves inicials amb bateries

Havent comprovat el correcte funcionament del convertidor en marxa, amb càrrega i amb control en llaç tancat, ja es podia passar de treballar amb fonts de CC independents que asseguren una tensió fixa a connectar les bateries, per realitzar les proves realment desitjades per la investigació del GREP. En aquest punt es va haver de redistribuir l'espai fins acabar tal com s'ha vist al capítol de Sistema i a l'apartat anterior, ja que les bateries ocupen bastant espai i estan col·locades al costat contrari d'on estava la torre mòbil de fonts de tensió.

Les primeres proves amb les bateries van seguir una estructura totalment anàloga a les proves prèvies amb fonts de tensió independents. Amb les bateries amb un nivell de càrrega qualsevol, es va procedir a:

- Provar el convertidor trifàsic sense control (l'laç obert) i sense càrrega.
- Provar el convertidor trifàsic en l'laç obert i amb càrrega RL.
- Provar el convertidor trifàsic en l'laç tancat (amb el control activat) i amb càrrega RL, comprovant que el control actua com és degut segons l'estat de les bateries.

En tots tres casos el convertidor va funcionar com s'esperava, les tensions i els corrents mesurats tant pels sensors com per l'oscil·loscopi eren correctes i el control funcionava de forma correcta, exactament igual que amb les fonts independents. A la Figura 4.17 es pot veure una captura realitzada a la pantalla de l'oscil·loscopi (amb el mode d'estalviar tinta activat, per això el fons blanc) amb les tensions de les tres fases respecte el nivell de 0 V a la part de contínua, i el corrent a una de les fases d'alterna. Podem veure, a la part central de la pantalla, on hi ha un zoom de les ones que es veuen a la part superior, com les tensions canvien entre els quatre nivells previstos, aproximadament a 0, 50, 100 i 150 V (comptant que cada marca de la quadrícula, com s'indica a baix, són 100 V), amb els temps de connexió a cada nivell diferents a cada una de les tres mesures ja que les ones han d'estar desfasades, tal com es pot veure a la part superior de la pantalla amb menys ampliació. En aquesta mateixa part es pot apreciar com el corrent pren una forma sinusoidal gairebé perfecta.

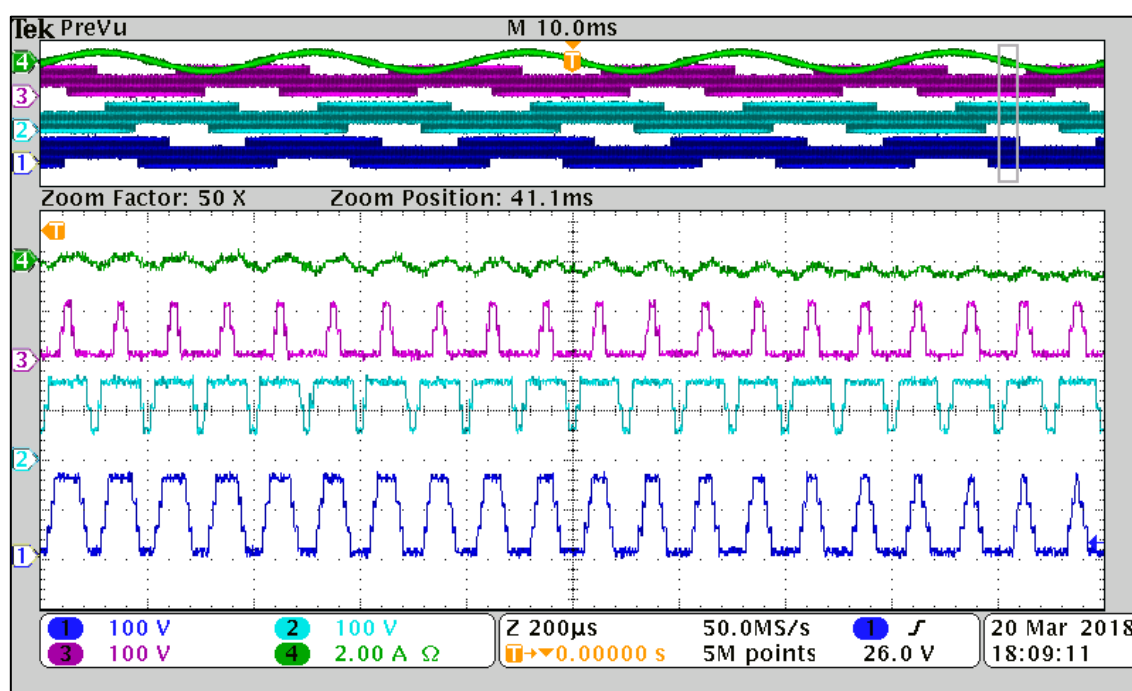


Figura 4.17 – Captura de l'oscil·loscopi: tensions de les tres fases referides al GND de contínua i corrent d'una fase

Un cop fetes aquestes proves, de naturalesa curta, que comprovaven el correcte funcionament del convertidor pròpiament dit, es va procedir a fer un assaig general, per comprovar que també funcionessin correctament tots els sistemes de captura de dades durant un temps més prolongat: una prova amb el convertidor trifàsic amb el control en llaç tancat i amb càrrega RL, les tres bateries totalment carregades i amb tots els programes de captura de dades activats (oscil·loscopi, ControlDesk i càmera tèrmica), una prova llarga per comprovar el sistema complet, fins que saltés alguna protecció, esperant que fos la desconexió prevista del sistema quan una bateria es descarrega per sota d'un llindar i tot s'ha d'aturar.

No va haver-hi imprevistos i tot va funcionar correctament, els programes de captura van desar els arxius amb totes les dades, les captures de pantalla i d'imatges tèrmiques es van desar correctament, i el convertidor es va aturar tot sencer de cop quan una de les tres bateries va passar pel llindar de tensió de desconexió. Un cop passada aquesta prova de foc, ja es podien començar les proves definitives, no sense abans configurar paràmetres i sensors.

4.2.3. Calibratge i càrrega

Abans de poder realitzar les proves finals, cal calibrar correctament tots els sensors de tensió i corrent de la part de contínua, així com calcular la càrrega de les bateries quan estan completament carregades. Per fer-ho es va connectar una càrrega electrònica (que podem veure a la Figura 4.18) a cada bateria per separat per tal de descarregar amb un corrent constant.



Figura 4.18 – Càrrega electrònica i multímetres

La càrrega electrònica té tres canals aïllats, formant tres circuits diferents, un per cada bateria, compostos per la bateria, la càrrega, un multímetre per comprovar el corrent real en cada instant, i els sensors de corrent de la torre de sensors.

Per realitzar les descàrregues a corrent constant, mesurar la capacitat i calibrar els sensors de corrent, els passos a seguir eren els següents:

- Encendre tots els dispositius: SAI, *dSpace*, ordinador, fonts i càrrega.
- Desactivar “*Input*” a la càrrega electrònica. L’aparell per defecte s’encén amb la càrrega encesa, però volem apagar-la fins tenir-ho tot configurat.
- Connectar els cables negres de la càrrega a les bateries.
- Connectar els cables vermells de les bateries als sensors, per tal de posar els sensors de corrent de la torre en sèrie amb bateries i càrrega.
- Connectar els cables blaus dels sensors als vermells dels multímetres, tancant el circuit (els multímetres s’havien connectat al terminal positiu de la càrrega prèviament, i no es desconnectaven per comoditat).
- Configurar la càrrega electrònica, pels tres canals diferents:
 - Mode de corrent constant.
 - Rang de 12 A. La càrrega té dos rangs, per corrents fins a 12 o 120 A. Ja que les descàrregues es fan a 4 A, el rang més indicat és el menor, ja que proporcionarà més precisió. El mode es reinicia cada cop que s’engega la càrrega, per tant s’ha de configurar sempre.
 - Valor del corrent 4 A, ja que la càrrega nominal ronda els 4 A·h.
- Abans de tornar a polsar el botó “*Input on/off*” per activar la càrrega, calibrar el *offset* dels sensors de corrent al *ControlDesk*. A l’estar en circuit obert, han de mesurar 0 A tots tres.
- Activar “*Input*” de la càrrega per començar la descàrrega.
- Modificar el corrent de la càrrega segons les lectures dels multímetres. Tot i programar 4 A, molts cops el corrent real era major, i s’havia d’ajustar.
- Ajustar els guanys dels sensors de corrent al *ControlDesk* per tal que les mesures dels sensors i les dels multímetres coincideixin.
- Esperar a la descàrrega completa de les bateries.
- Anotar temps d’inici i de final de la descàrrega, així com el SOC final indicat pel *ControlDesk*. Amb aquestes dades es calcula la càrrega total.
- Registrar els resultats al full d’Excel de Calibratge.

Per calcular la càrrega de les bateries es van utilitzar dos mètodes, el primer usant el temps de durada de la prova i el corrent (Eq. 1), i el segon amb l'estat de càrrega final i la càrrega nominal introduïda al *ControlDesk* per calcular el SOC (Eq. 2).

$$Q_{bat} = I \cdot (t_{final} - t_{inicial}) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Q_{bat} = (1 - SOC_{final}) \cdot Q_{nom} \quad (\text{Eq. 2})$$

Ambdós mètodes donaren resultats similars, obtenint així la nova càrrega nominal a introduir com a paràmetre al *ControlDesk* de cara a les primeres proves.

Els sensors de tensió es calibraren a continuació, primer sense connectar les bateries per ajustar l'*offset* fins que les mesures fossin de 0 V, i després connectant les bateries i comprovant els números del *ControlDesk* amb les mesures d'un voltímetre.

Aquest procés de descàrrega de les bateries per calibrar sensors i obtenir la càrrega total de les bateries es va fer varies vegades, una cada cop que es canviava de cas d'estudi, i cada calibratge servia per un parell de proves (el mateix cas d'estudi amb control i sense control), per això es portava un registre en un full d'Excel amb totes les càrregues, *offsets* i guanys calculats.

Evidentment, abans de cada prova o calibratge, que suposen la descàrrega completa de les bateries, aquestes s'han de carregar totalment. Aquest procés es duia a terme amb els carregadors que es poden veure a la Figura 4.1, clarament etiquetats per carregar sempre les bateries amb el mateix carregador, connectant-los als respectius cables blancs que es poden veure a la dreta. Les càrregues duraven de l'ordre de dues hores.

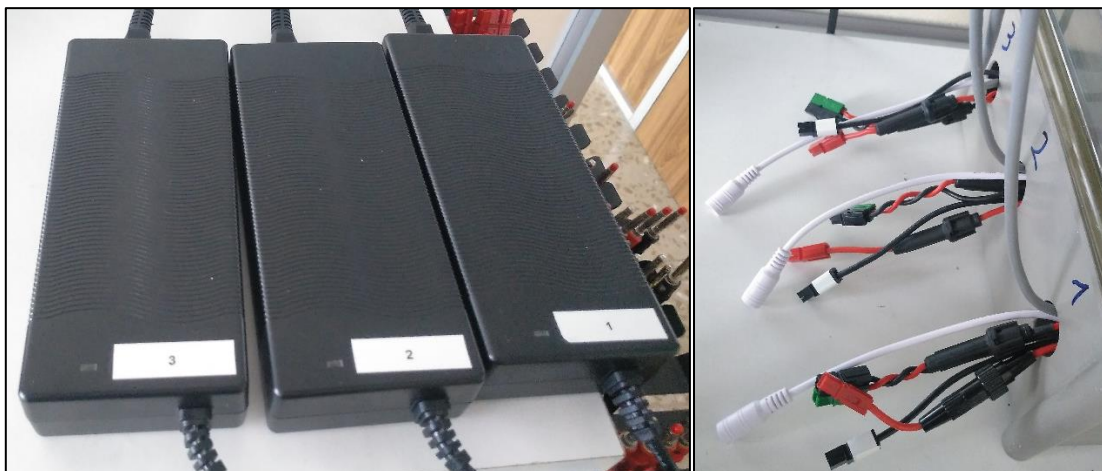


Figura 4.19 – Carregadors i cables de connexió de les bateries

4.2.4. Proves definitives segons els casos de l'article

Amb tots els sensors calibrats, les càrregues determinades i les bateries plenes, es van iniciar les proves finals per comprovar l'eficàcia del convertidor amb el control programat i poder comparar amb les simulacions dels mateixos casos fetes amb *Matlab*, i que s'inclourien a l'article de recerca final sobre el projecte.

Totes les proves, per tant, són amb les tres fases del convertidor connectades, amb la càrrega RL fixada (totes les etapes de les estufes enceses) i descarregant les bateries fins que salti alguna protecció, capturant-ho tot tant des del *ControlDesk* com des de l'oscil·loscopi i la càmera tèrmica. Els casos estudiats i els paràmetres que els diferencien es poden veure a la Taula 4.1.

Cas	SOC _{1,ini}	SOC _{2,ini}	SOC _{3,ini}	Control	k _{màx.}
Cas 1a	1	0,8	1	Desactivat	±0,12
Cas 1b	1	0,8	1	Activat (SOC)	±0,12
Cas 2a	0,8	1	1	Desactivat	±0,15
Cas 2b	0,8	1	1	Activat (SOC)	±0,15
Cas 3a	1	1	1	Desactivat	±0,12
Cas 3b	1	1	1	Activat (SOC)	±0,12

Taula 4.1 – Paràmetres dels diferents casos estudiats

Així doncs, són tres casos diferents, segons els estats de càrrega inicials de les tres bateries, i cada un amb dues proves per comprovar les diferències als resultats entre no tenir activat cap tipus de control i activar el control per SOC, que intenta igualar els estats de càrrega de les tres bateries al llarg de la prova canviant el valor dels corrents de cada una amb les accions de control k , limitades a certs valors segons el cas.

Per aconseguir que una de les bateries tingués el 80% de la càrrega a l'inici de les proves, es va usar la càrrega electrònica, fent que forçés un corrent en amperes del mateix valor que la càrrega nominal en amperes hora, durant 12 minuts, que és el 20% d'una hora.

Un cop fetes les dues primeres proves es va poder comprovar que si es carregaven les bateries i es feia la prova de seguida, les bateries iniciaven la prova amb una temperatura molt més alta que la ambient, ja que s'havien escalfat durant la càrrega, i per aquest motiu al finalitzar la prova encara hi romania aproximadament un 3% de la capacitat nominal, és a dir, que a l'estar més calentes no proporcionaven tota l'energia possible durant la descàrrega. Això es va corregir deixant reposar sempre les bateries unes 12 hores entre els processos successius de càrrega i descàrrega, fent sempre una prova un matí, carregant per la tarda i esperant al dia següent.

4.2.5. Planificació de les proves

Per la realització de les proves definitives es va fer una petita planificació per saber aproximadament la data de finalització de les proves i poder organitzar el temps. Abans de les proves definitives no tenia sentit planificar-les, ja que les tasques no tenien un temps de realització concret i a més anaven sortint errors que calia corregir. Un cop fet l'assaig general amb èxit, es va fer la planificació de les primeres proves amb el calendari a la mà.

A la Taula 4.2 es pot veure un petit calendari amb totes les tasques destacades fetes fins el dia de l'assaig general en gris, i amb els dies festius i caps de setmana en taronja, incloent Setmana Santa, i finalment la planificació de les proves en negre. Aquest calendari es va elaborar el dia 11 d'abril de 2018, casella marcada en blau. Un cop acabades les proves dels casos 1 i 2 es va decidir tornar a planificar per decidir si repetir-les o seguir amb el cas 3.

DILLUNS	DIMARTS	DIMECRES	DIJOUS	DIVENDRES	DISSABTE	DIUMENGE
19/3 Reparar	20/3 Detecció	21/3 Reparar	22/3 (fonts) Prova 2F	23/3 (fonts) Prova 3F	24/3	25/3
26/3 Festiu	27/3 Festiu	28/3 Festiu	29/3 Festiu	30/3 Festiu	31/3	1/4
2/4 Festiu	3/4 Proves font	4/4 Organitzar	5/4 Proves bat	6/4 Prova 10'	7/4	8/4
9/4 Reparar	10/4 Prova 10'	11/4 Assaig 1h	12/4 Calibrar	13/4 Cas 1a	14/4	15/4
16/4 Cas 1b	17/4 Calibrar	18/4 Cas 2a	19/4 Cas 2b	20/4 Planificar	21/4	22/4

Taula 4.2 – Planificació inicial de les proves

Malauradament, durant l'execució de les primeres proves hi va haver un parell d'errors, primer la no extracció de tota l'energia de les bateries per no deixar-les reposar (havent de repetir la prova al dia següent) i després un error degut al soroll dels senyals dels sensors que va fer aturar el convertidor abans d'hora (per sort, afegir els filtres va ser ràpid i es va poder realitzar la prova el mateix dia, ja que no s'havien descarregat massa les bateries). A la Taula 4.3 es poden observar els canvis necessaris respecte la planificació anterior, així com la planificació de les repeticions i proves del cas 3 que es van decidir fer el 23 d'abril.

DILLUNS	DIMARTS	DIMECRES	DIJOUS	DIVENDRES	DISSABTE	DIUMENGE
9/4 Reparar	10/4 Prova 10'	11/4 Assaig 1h	12/4 Calibrar	13/4 Cas 1a	14/4	15/4
16/4 (ERR) Cas 1b	17/4 Cas 1b	18/4 Calibrar	19/4 Cas 2a	20/4 (ERR) Cas 2b	21/4	22/4
23/4 Planificar	24/4 Calibrar	25/4 Cas 1b	26/4 Cas 1a	27/4 Calibrar	28/4	29/4
30/4 Cas 2b	1/5 Festiu	2/5 Cas 2a	3/5 Calibrar	4/5 Cas 3a	5/5	6/5
7/5 Cas 3b	8/5 Cas 3a	9/5 Cas 3b	10/5	11/5	12/5	13/5

Taula 4.3 – Calendari final de les primeres proves i planificació de les últimes

En aquestes proves, però, també va haver-hi imprevistos i errors que van causar un retard de dos dies respecte a la planificació original. Primer un descuit a la descàrrega amb la càrrega electrònica va impedir calibrar els sensors, i després, altre cop degut al soroll dels cables de mesura dels sensors, el convertidor es va apagar de forma prematura per un pic de corrent fora dels límits establerts (va fer que una alarma per diferència de corrent entre bateries saltés). Això va portar a la substitució dels cables per uns amb el senyal en mode diferencial, més immunes al soroll, entre les proves dels casos 2 i 3, i també a ampliar el rang de diferència de corrents entre bateries per evitar una possible apagada abans de canviar els cables.

A la Taula 4.4 es pot veure el calendari final de la conducció de les proves, que acabaren el 11 de maig de 2018, dos dies més tard del que s'havia previst. A més, només es va calibrar un cop a l'inici de les proves del cas 3, i no al tornar-les a repetir, donat que es van fer seguides.

DILLUNS	DIMARTS	DIMECRES	DIJOUS	DIVENDRES	DISSABTE	DIUMENGE
9/4 Reparar	10/4 Prova 10'	11/4 Assaig 1h	12/4 Calibrar	13/4 Cas 1a	14/4	15/4
16/4 (ERR) Cas 1b	17/4 Cas 1b	18/4 Calibrar	19/4 Cas 2a	20/4 (ERR) Cas 2b	21/4	22/4
23/4 Planificar	24/4 (ERR) Calibrar	25/4 Calibrar	26/4 Cas 1b	27/4 Cas 1a	28/4	29/4
30/4 Calibrar	1/5 Festiu	2/5 Cas 2b	3/5 (ERR) Cas 2a	4/5 Cas 2a	5/5	6/5
7/5 Calibrar	8/5 Cas 3a	9/5 Cas 3b	10/5 Cas 3a	11/5 Cas 3b	12/5	13/5

Taula 4.4 – Calendari final de totes les proves

5. Processat de dades

Per poder veure els resultats de les proves, es necessitava alguna manera de representar els gràfics importants a partir de les dades de forma ràpida i el més automatitzada possible, per poder veure els resultats immediatament a l'acabar la prova corresponent i sense haver de repetir el mateix procediment. D'aquesta necessitat va sortir la idea de fer un programa per automatitzar la representació de les dades i poder obtenir tots els gràfics d'interès a partir dels fitxers de dades capturades amb el *ControlDesk* i des de l'oscil·loscopi amb *Matlab*.

El codi sencer del programa es pot trobar a l'Annex B.2, i en aquest capítol s'explicarà el seu funcionament i les millores introduïdes des de la seva creació.

Abans de res, cal crear un directori i posar-hi a dins els dos arxius .mat amb les dades de la prova a analitzar. El nom del directori és recomanable que sigui distintiu i que identifiqui la prova analitzada. Dins del directori hi pot haver més arxius i carpetes, però és important que només hi hagi un arxiu .mat amb les dades extretes de l'oscil·loscopi amb el prefix "dades", i només un arxiu .mat amb les dades gravades amb el *ControlDesk* provinents dels sensors de la part de contínua, amb el prefix "exp1_". A la pràctica, en aquests directoris s'hi afegien, també, per cada prova, l'arxiu de captures d'imatge tèrmica amb format .tirr, i el directori creat pel programa de captura de dades de l'oscil·loscopi amb totes les captures de pantalla de a dins.

Aquest pas previ és necessari perquè a l'executar el programa el primer que es demana és que l'usuari entri el nom del directori on estan els dos fitxers de la prova a analitzar.

El fitxer de dades de l'oscil·loscopi és ben senzill, a dins hi té simplement una variable anomenada "dades" que no és més que una matriu amb dues columnes, l'instant de la captura en segons relatiu a l'inici de la prova (entre 0 i 3600 aproximadament) a la primera, i el valor de la potència capturada en aquell instant, en Watts, a la segona columna.

En canvi, el fitxer de dades desat pel *ControlDesk* és molt més complex. A dins hi ha una variable anomenada com l'arxiu, del tipus "*Struct*". Aquest tipus de variable és una estructura formada per camps, i cada camp és una parella del nom i el seu valor. Tant pel tipus d'organització com per les funcions i mètodes associats, són semblants als diccionaris de *Python* o als objectes de *Javascript*, que també s'estructuren en parelles de noms i valors. Els valors d'aquestes parelles poden ser, al seu torn, altres variables del tipus *Struct*, i fins i tot llistes de *Structs*, formant una estructura més complexa i amb més nivells i ramificacions. Efectivament, aquest és el cas del fitxer .mat generat pel *ControlDesk* al exportar les variables capturades amb un *Recorder*.

L'estructura creada pel ControlDesk té quatre camps:

- **Info:** conté una variable *Struct* amb alguns identificadors interns.
- **X:** conté una variable *Struct* amb diversos camps on hi ha informació de les dades de temps, sent els més destacats *Data*, on hi ha un vector amb tots els temps en els que s'han pres les mesures, i *Raster*, on està escrit el *Raster* assignat al *Recorder* del *ControlDesk*.
- **Y:** conté una variable que és una llista de *Structs*, concretament 18 de diferents, un per cada variable enregistrada amb el *Recorder*. Aquest tipus de variable fa que als valors de tots els camps (en aquest cas, hi ha 16 camps diferents) hi hagi sempre 18 elements, per exemple, al camp *Name* hi ha els noms de les 18 variables capturades, al camp *Data* hi ha 18 vectors diferents amb totes les dades, i així successivament. Una forma molt pràctica de veure aquestes llistes de *Structs* és convertint-los en taules, amb la comanda *struct2table()*, que malauradament no està disponible al *Matlab* del laboratori però es va fer servir en altres ordinadors. Es pot veure part del contingut (6 dels 16 camps) dins del camp Y en forma de taula al usar aquesta comanda a la Figura 5.1.
- **Description:** conté una variable *Struct* amb camps que contenen altres *Structs*, amb informació sobre usuari, data, condicions del *Recorder* i durada de la prova.

```
>> struct2table(exp1_016.Y)
ans =
18x16 table
```

Name	Type	Data	Unit	Raster	Device
'SOC1'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'SOC2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'SOC3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'TaB1'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'TaB2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'TaB3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'Tamb'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iB1'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iB2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iB3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iBav1'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iBav2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'iBav3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'k2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'k3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'vB1'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'vB2'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'
'vB3'	4	[1x3002 double]	''	'HostService Downsampled'	'Platform'

Figura 5.1 – Taula de la llista de *Structs* al camp Y de l'arxiu de dades desat pel *ControlDesk*

Per aconseguir processar les dades i fer gràfics, dins de totes aquestes estructures el més important són els camps *Name* i *Data* dins de *Y*, per tenir noms i dades de totes les variables registrades, i també *Data* dins de *X*, per tenir els temps en el que s'han pres aquestes dades.

Un cop entesa l'estructura dels fitxers de dades, es pot seguir amb el procediment del programa de representació gràfica. Quan el programa ja té carregats els arxius, el primer que fa és assignar a dues variables els temps de captura dels dos fitxers.

Llavors cerca els índexs dins la llista de *Structs* de les variables amb els noms d'interès, i just després crea unes matrius agrupant pel tipus de variable, fent, per exemple, una matriu de tres files (una per bateria) de les dades de tensió, una matriu de tres files per les dades de corrent i una altra pels SOCs, així com una matriu de quatre files per les temperatures i una de només dues files per les variables de control. Aquest és un exemple amb les dades tractades per totes les proves realitzades, però si hi hagués un nombre diferent de bateries el programa funcionaria igual creant matrius de més o menys files.

Tenint ja organitzades les variables en matrius, es calcula la potència a les bateries, la càrrega extreta en $A \cdot h$ i l'energia extreta en $W \cdot h$, i es preparen vectors i variables per la generació automàtica dels gràfics. Llavors, de la mateixa forma que en el programa de captura de dades de l'oscil·loscopi, es crea un directori nou amb el prefix "*Plots*" i un nombre que va incrementant segons els continguts del directori indicat. És a dir, si s'executa en un directori buit, es crearà *Plots1*, i si s'executa una segona vegada estant *Plots1* present al directori, es crearà *Plots2*, i així successivament.

Havent fet tots aquests preparatius, llavors el programa comença a generar els gràfics d'interès. Primer es generen i desen en un bucle els gràfics de tensions, corrents, SOCs i potències a les bateries, ja que tots presenten característiques similars i només cal canviar de variable. Llavors es fa el gràfic de temperatures, que només es diferencia per tenir quatre variables en comptes de tres.

A continuació es realitza el gràfic de comparació entre la potència d'entrada (la de les bateries, del costat de contínua) amb la de sortida (la que s'entrega a la càrrega i mesura l'oscil·loscopi al costat d'alterna), obtenint també el rendiment. Aquest gràfic és totalment diferent a la resta, tenint dos eixos verticals a esquerra i dreta, i necessitant el tractament previ de les dades capturades per l'oscil·loscopi, que s'interpolen fins tenir una dada per segon per tenir un gràfic continu als mateixos punts que les captures del costat de contínua, i també s'integren per obtenir l'energia entregada.

L'últim gràfic és el de les variables de control, similar als primers però només amb dues línies de dades. Aquest es genera de forma automàtica sempre que s'executa el programa, per tant també en els casos on el control està desactivat, per comprovar que s'han mantingut a zero.

Acabats de generar tots els gràfics, llavors es procedeix a desar les dades més importants en un fitxer Excel que serveix com a Diari de les proves. Les columnes d'aquest full seran: nom, data i durada de la prova, primera bateria a desconnectar-se, càrrega extreta de cada bateria, suma de les tres, energia extreta de cada bateria, suma de les tres i rendiment del convertidor.

Totes aquestes dades també es mostren per pantalla a l'executar el programa per tal de no haver d'anar obrint i tancant el full d'Excel cada cop que es fa una prova. Si al directori on està aquest programa de *Matlab* no hi ha un fitxer Excel amb un nom que contingui la paraula "diari", llavors el programa en crea un de nou amb les capçaleres corresponents a totes les dades a desar, i desa aquestes dades a la segona fila, just a sota de la capçalera. Si per contra ja hi ha un diari de les proves en forma de fitxer d'Excel, llavors simplement es comprova fins a quina fila hi ha dades escrites i s'hi escriuen les noves a la fila següent.

Aquest programa es va començar entre la finalització dels programes de captura de dades i l'inici de les proves, mentre es feien altres tasques de suport. De tota manera, al principi era molt més bàsic i les funcionalitats de desar les dades en un full d'Excel o de mostrar alguns valors per pantalla es van afegir un cop fetes algunes proves, per la necessitat d'estalviar temps i la comoditat de que es mostrin automàticament.

Fins i tot un cop acabades totes les proves s'han introduït algunes millores més, com per exemple l'eliminació dels rendiments sense sentit que apareixien a l'encesa i apagada del convertidor (ambdues mesures de potència passen de 0 a un valor o viceversa i depèn com en un punt interpolat entre mesures la potència de sortida pot estar per sobre de la d'entrada, generant rendiments per sobre de la unitat per dividir dos valors no vàlids). El procediment per filtrar els rendiments sense sentit és ben senzill: es recorren totes les dades de rendiment, i si són majors a 1 o menors a 0 s'eliminen directament. Si la potència de sortida és menor a 400 W també s'eliminen, ja que mai s'arriba a aquest valor amb el convertidor funcionant correctament, i finalment s'eliminen les dades dels dos primers minuts de forma arbitrària, ja que a les proves sempre s'encenia el convertidor passats uns 30 segons des de l'inici de la captura, i llavors s'anaven activant les etapes de les estufes per arribar a la càrrega desitjada, augmentant la potència amb salts cada pocs segons i fent que el rendiment, tot i complir-se les altres condicions, no tingués cap validesa. Pot ser que el rendiment s'estabilitzés abans dels dos minuts, però de cara a la representació gràfica la diferència no és apreciable tenint un temps total entorn una hora.

Podem veure la diferència entre els gràfics de potència i rendiment abans i després de la modificació a la Figura 5.2, on s'han ampliat i retallat els gràfics originals per mostrar l'inici de la prova. Clarament es veu com la línia rendiment al segon gràfic comença en un punt estable i tota la inestabilitat sense sentit de l'inici que es veu al primer desapareix. També s'ha ajustat l'escala de l'eix dret perquè fos més precisa i ajustada als resultats.

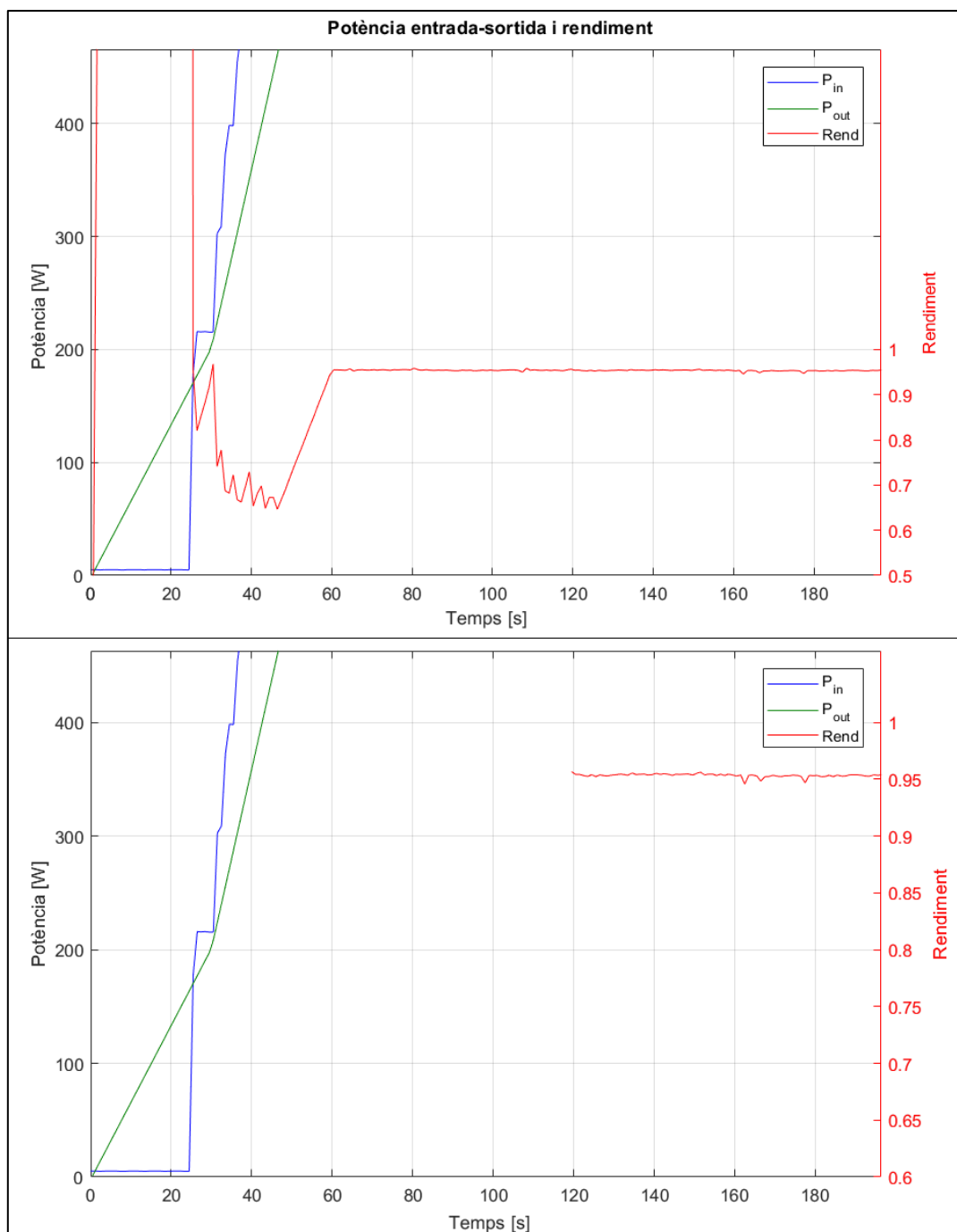


Figura 5.2 – Comparació entre detalls dels gràfics abans i després del filtrat de les dades de rendiment

6. Resultats experimentals

Amb totes les proves realitzades amb èxit i les dades anotades, ja es pot passar a analitzar de forma global tots els resultats experimentals. Aquest capítol està dividit en apartats que analitzen diversos aspectes dels resultats, primer amb una taula de comparació global, després amb representacions gràfiques d'algunes de les proves, després amb comparacions i detalls dels resultats davant les problemàtiques més destacades (soroll i repòs de les bateries) i finalment, la comparació dels resultats experimentals amb les simulacions proporcionades pel GREP.

6.1. Taula de resultats globals

Els resultats més importants per les proves, de cara a la recerca sobre el convertidor multinivell i el control emprat, són la durada de la prova i l'energia extreta de les bateries, així com l'entregada a la càrrega d'alterna. S'ha de comprovar doncs que les proves realitzades amb el control activat donen millors resultats que les realitzades sense control, per tal de demostrar que el control és útil i efectiu.

A la Taula 6.1 es presenten aquests resultats de forma resumida. Són dades extretes del full d'Excel creat com a Diari de les proves de forma automàtica gràcies al programa descrit al capítol anterior, en concret, per cada cas diferent, la repetició (cada prova es va fer dos cops, per comprovar resultats), la durada, la primera bateria que es va desconectar, l'energia extreta de les bateries i l'energia entregada a la càrrega al costat d'alterna i el rendiment del convertidor. Les energies es van calcular integrant les potències (tensió per corrent) pel temps de la prova.

Cas	Rep.	Durada [s]	1a OFF	E_{DC} [W·h]	E_{AC} [W·h]	η [%]
Cas 1a	1	3016	2	461,66	442,44	95,84
	2	3001	2	472,47	446,96	94,60
Cas 1b	1	3535	2	537,98	509,90	94,78
	2	3523	3	545,17	518,22	95,06
Cas 2a	1	3006	1	472,63	449,50	95,10
	2	3003	1	473,38	446,85	94,40
Cas 2b	1	3517	1	544,16	515,51	94,73
	2	3543	1	541,79	516,68	95,37
Cas 3a	1	3804	3	583,28	554,04	94,99
	2	3721	3	584,87	557,78	95,37
Cas 3b	1	3687	1	585,72	553,41	94,48
	2	3721	1	585,49	555,94	94,95

Taula 6.1 – Resultats destacats de les proves

Cal recordar que els casos es diferencien, principalment, per l'estat de càrrega inicial de les tres bateries: al cas 1 la segona (central) comença al 80% mentre que les altres comencen amb la càrrega nominal sencera, al cas 2 és la primera la que comença al 80% amb les altres plenes, i al cas 3 totes les tres bateries comencen al 100% de càrrega.

Així doncs, es pot observar com els casos 'b', que corresponen a les proves amb el control activat, duren uns 500 segons més pels casos 1 i 2, on hi ha una bateria parcialment descarregada a l'inici, respecte als casos 'a', on no s'activa el control. Aquest increment de durada és positiu, ja que vol dir que les bateries han trigat, en conjunt, més temps a descarregar-se. Pel cas 3, com les bateries comencen plenes, no hi ha canvis significatius en la durada de les proves.

La primera bateria en apagar-se també és un resultat interessant, ja que indica quina bateria ha passat per sota del llindar de tensió mínima permès pel BMS ("*Battery Management System*") inclòs a cada bateria. En les proves sense control dels casos 1 i 2, està clar que la primera bateria en apagar-se és la que comença amb menys càrrega, però es pot observar que en el cas 1b, a la segona repetició la primera bateria que es va apagar va ser la 3, tot i haver començat amb la segona bateria més descarregada. Aquest és un bon senyal, ja que indica (com es demostrarà més endavant) que els estats de càrrega de les bateries es van igualar i llavors totes tres eren candidates a ser les primeres en desconnectar-se. Al cas 3, com totes tres bateries començaven amb la càrrega plena, els canvis poden raure al càlcul de la capacitat de les bateries durant el procés de descàrrega usant la càrrega electrònica.

A continuació estan els resultats de l'energia total extreta de les tres bateries, calculada com la suma de les energies extretes de cada bateria per separat, calculades al seu torn com la integral de la potència durant el temps de la prova, és a dir, del corrent per la tensió en cada instant mesurat. Es pot comprovar com en tots els casos sense excepció, amb control s'extreu més energia de les bateries que sense.

Com aquests resultats són els més importants de cara a l'eficàcia del control, és interessant mirar-los en detall, per exemple amb les energies extretes de cada bateria per separat, com es mostra a la Taula 6.2. En aquesta taula (on s'han fet les mitjanes de tots els resultats per les dues repeticions) es posa de manifest de forma molt clara l'efecte del control als casos 1 i 2, ja que comparant les energies extretes de la bateria 2 al cas 1, entre a i b, no hi ha diferències notables, com a la bateria 1 al cas 2, donat que és la bateria que comença més descarregada i per tant de la que, sense activar el control, també s'extreu tota l'energia possible. Ara bé, per les altres bateries la diferència és claríssima, s'extrauen de l'ordre de 35 W·h més per bateria. Al cas 3, com era d'esperar, els resultats són semblants amb lleugeres millores amb el control activat.

Cas	E_{Bat1} [W·h]	E_{Bat2} [W·h]	E_{Bat3} [W·h]
Cas 1a	157,72	151,48	157,86
Cas 1b	194,18	152,91	194,49
Cas 2a	152,74	160,05	160,22
Cas 2b	152,83	195,24	194,91
Cas 3a	194,73	194,89	194,45
Cas 3b	196,03	195,14	194,43

Taula 6.2 – Energia extreta de cada bateria per separat segons el cas

També és molt important veure la diferència relativa entre els resultats amb control i sense control, un cop sumades les energies de les tres bateries, per saber la millora que proporciona el nou control del convertidor. Aquests resultats es poden veure a la Taula 6.3, i com es podia esperar donats els resultats previs, la millora en els casos 1 i 2 és considerable, entre un 15% i un 16% d'energia addicional a l'activar el control (b) respecte no activar-lo (a). En el cas 3, també com ja s'havia vist, les diferències són gairebé negligibles, però sí val a dir que en cap cas el control empitjora els resultats respecte al mateix cas amb el control desactivat, i fins i tot en el cas 3, on en principi el control no hauria de fer res, es corregeixen les possibles descompensacions i l'energia és consistentment una mica major al cas sense control.

Cas	$E_{\text{DC, (a)}}$ [W·h]	$E_{\text{DC, (b)}}$ [W·h]	ΔE_{DC} [%]
1	467,07	541,58	15,95%
2	473,01	542,97	14,79%
3	584,07	585,60	0,26%

Taula 6.3 – Comparació de les energies amb i sense control

Deixant l'energia del costat de contínua i tornant a la taula original, és a dir, la Taula 6.1, encara hi ha dues columnes més, primer l'energia entregada a la càrrega, calculada com la integral de la potència calculada per l'oscil·loscopi, i després el rendiment del convertidor calculat com l'energia del costat d'alterna entre la del costat de contínua. En tots els casos el rendiment està entorn el 95% i no es pot observar una tendència consistent entre els casos amb control respecte als casos amb el control desactivat, ja que les diferències (positives i negatives, aquest cop) són menors al 0.5% (tant en nombres absoluts com relatius).

6.2. Representació gràfica dels resultats

Amb tots els resultats mostrats a l'apartat anterior ja es pot veure l'eficàcia del control proposat, però amb totes les dades desades es pot anar més enllà i analitzar més a fons, o simplement tenir una vista gràfica de totes les proves en funció del temps, ja sigui cada una per separat o comparant-les entre elles, obtenint una visió molt més àmplia del desenvolupament de les proves, i gràcies al programa descrit al capítol de processat de dades, aquestes representacions són ràpides i senzilles de fer per les diverses magnituds capturades.

En aquest apartat no es mostraran tots els resultats gràfics, ja que molts són repeticions entre proves i d'altres molt semblants entre ells, sinó que es farà una selecció per comentar els resultats i les diferències més destacades. La col·lecció sencera de representacions gràfiques de les proves es pot trobar a l'Annex C.

6.2.1. Cas 1

Primer s'analitzaran més en detall alguns resultats del cas 1 de les proves experimentals. Per començar, a la Figura 6.1 es pot veure el gràfic (generat pel programa descrit al capítol 5) de les tensions a les tres bateries en tota la durada de la prova del cas 1a.

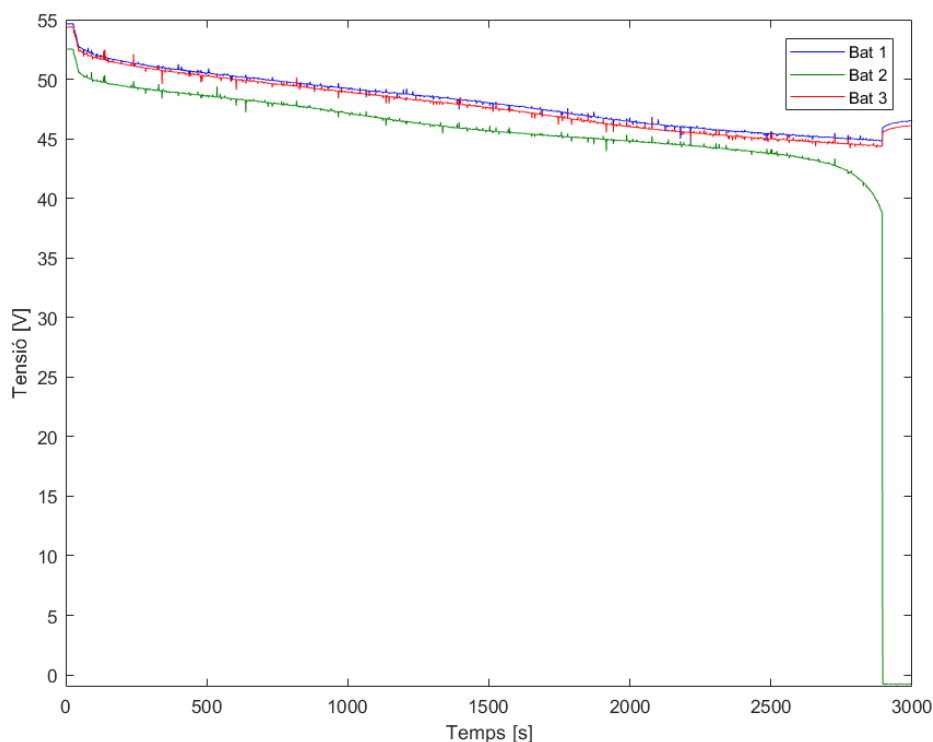


Figura 6.1 – Gràfic de tensions enfront el temps del Cas 1a (Segona repetició)

Aquest gràfic serveix com exemple de l'aspecte de tota la resta, i alhora permet veure que el comportament és l'esperat: com és una prova del cas 1, la segona bateria, en verd, comença amb menys càrrega i per tant una mica menys de tensió entre borns. Segons avança la prova, totes tres bateries van perdent tensió progressivament, i com és una prova sense control, les tensions segueixen trajectòries gairebé paral·leles, fins que finalment la bateria 2 es desconnecta cap als 3000 segons. També es pot apreciar com les mesures no són perfectes, i s'aprecia bastant de soroll en totes tres bateries.

La zona més important és la part final, ja que és on hi haurà diferències respecte al gràfic del mateix cas però amb el control activat, i és quan es produeix l'aturada del sistema. Així doncs, ampliant la part final i representant en el mateix gràfic els resultats de les proves amb i sense control del mateix cas (segona repetició del cas 1), s'obté el gràfic de la Figura 6.2, on s'han representat les tensions de les mateixes bateries amb els mateixos colors per les dues proves, i s'ha canviat l'estil de la línia per una de puntejada pel cas sense control. Es pot veure així clarament el temps de desconnexió de les dues proves, i la distància entre ells, i també com en el cas sense control les tensions estan separades, com s'ha vist abans, però en la prova amb el control activat les tensions al final són pràcticament iguals. A més, aquesta és just la prova en la que es desconnecta la bateria 3, que no era la que menys càrrega tenia a l'inici (la 2).

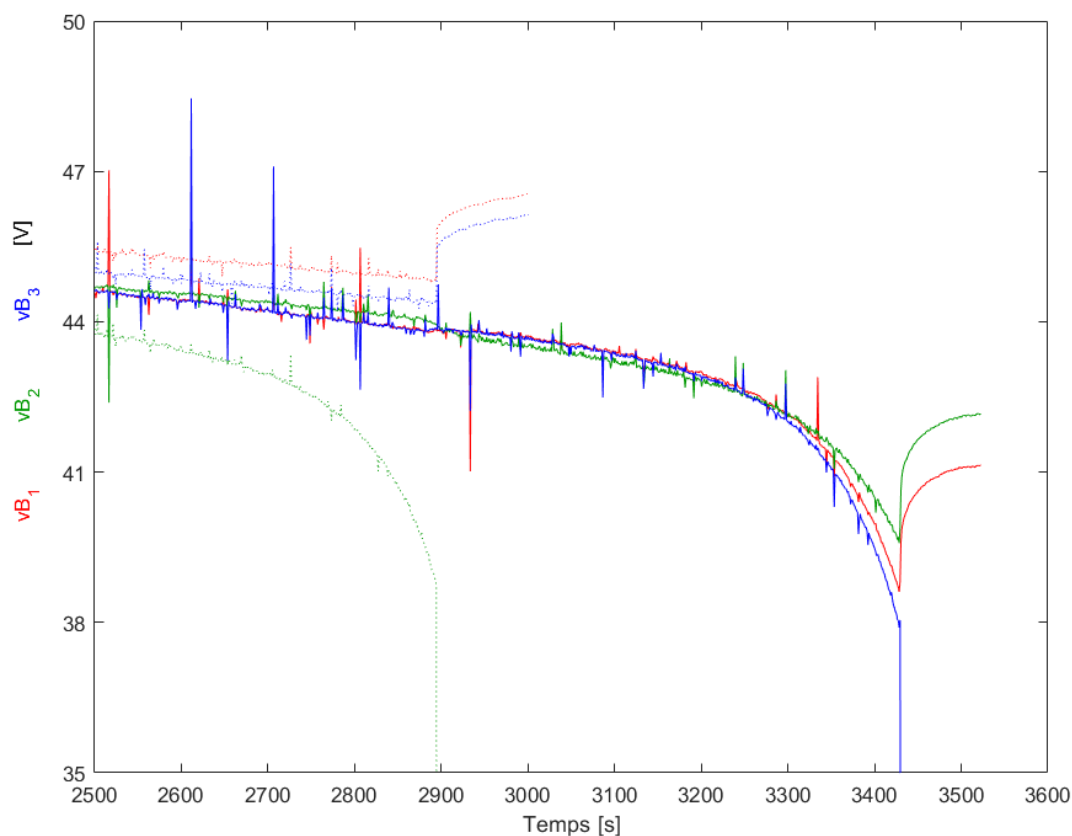


Figura 6.2 – Comparació de les tensions al final de les proves del Cas 1, amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

Havent vist l'evolució de les tensions, és lògic seguir amb els corrents. A la Figura 6.3 es pot veure l'evolució d'aquesta magnitud a les tres bateries per la segona repetició de les proves del cas 1, tal i com s'ha mostrat al gràfic de les tensions, amb els resultats de la prova sense control amb línies puntejades i els de la prova amb control amb línies sòlides. En aquest gràfic es pot veure com els tres corrents per les proves sense control són pràcticament idèntics al llarg de tota la prova, fins al punt de no poder-se distingir clarament. En el cas amb el control activat, però, es veu clarament com el corrent de la segona bateria, que és la que comença amb menys càrrega, és considerablement menor al de les altres dues bateries, totalment carregades a l'inici. Un cop s'equilibren els estats de càrrega i les tensions, el control deixa d'actuar de forma gairebé immediata, i tots tres corrents passen a ser idèntics. Aquest punt ocorre gairebé al final de la prova, de fet com es pot veure al gràfic coincideix amb el moment de d'aturada del cas sense control, però encara hi ha uns 10 minuts extra gràcies a haver activat el control on els corrents són iguals. És necessari destacar que les línies no són més gruixudes que en gràfic anterior, ho semblen degut a les oscil·lacions provocades pel soroll.

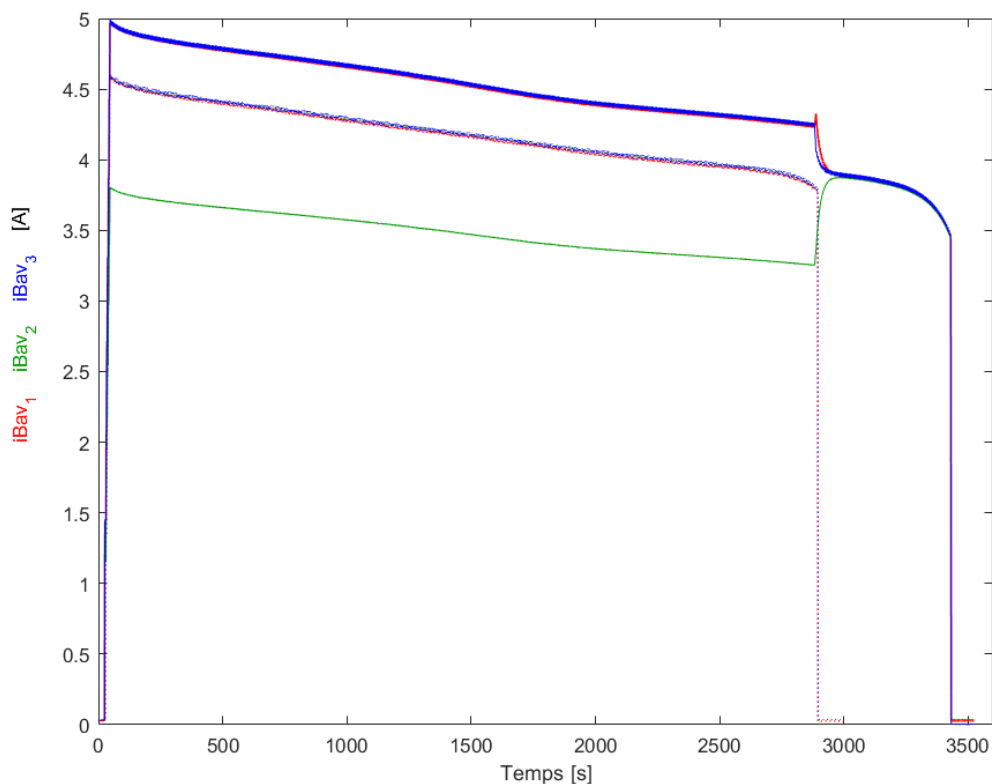


Figura 6.3 – Comparació dels corrents a les proves del Cas 1, amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

La següent variable que es pot representar és l'estat de càrrega. Pel que ja s'ha vist i dit, es pot esperar el que es veu a la Figura 6.4, on altre cop s'han dibuixat al mateix gràfic els resultats per les proves amb i sense control, sent les línies sòlides els SOC's de la prova amb control i les línies puntejades els SOC's de la prova sense control. Es veu clarament com sense control hi ha dues línies paral·leles, una per la bateria 2, que comença a 0,8 i acaba a 0, i una per les bateries 1 i 3, que es solapen des d'1 fins a aproximadament un 0,2. A la prova amb control, en canvi, aquestes línies tenen pendents diferents i s'acaben trobant aproximadament als 3000 segons, punt on el control deixa d'actuar, i segueixen juntes fins arribar gairebé a l'hora de durada.

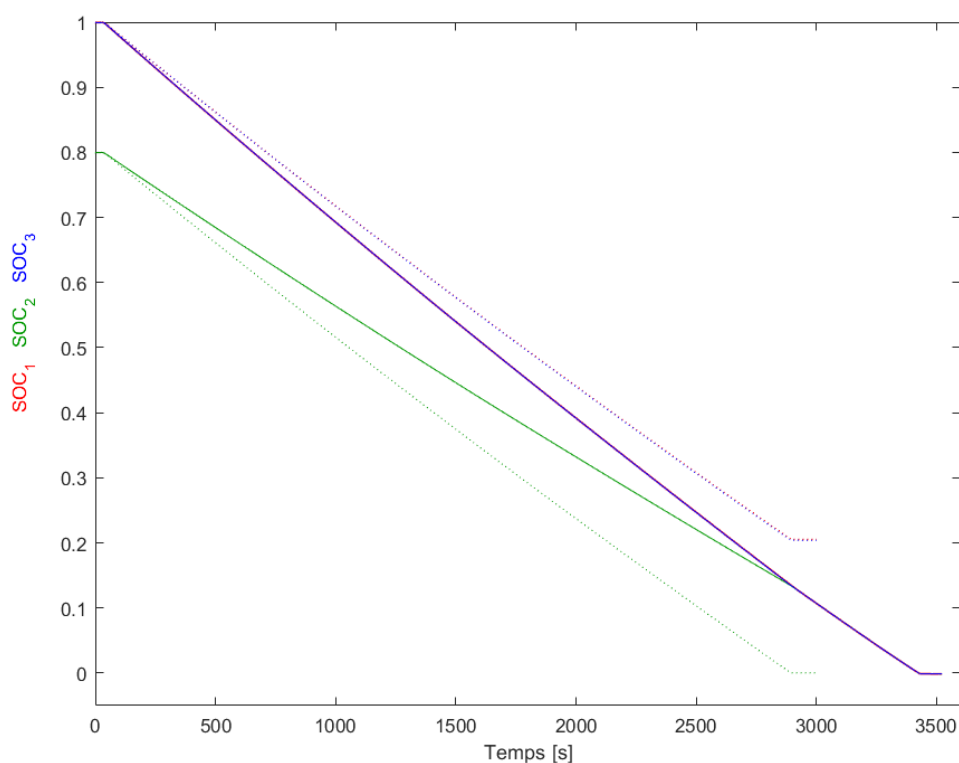


Figura 6.4 – Comparació dels SOC's a les proves del Cas 1, amb control (línies sòlides) i sense control (puntejades)

Aquestes accions de control també s'han gravat des del *ControlDesk*, i per tant es poden representar en un gràfic com el de la Figura 6.5, on es veu clarament que per la prova amb control aquest s'activa des de l'inici amb unes accions corresponents als valors màxims permesos ($\pm 0,12$).

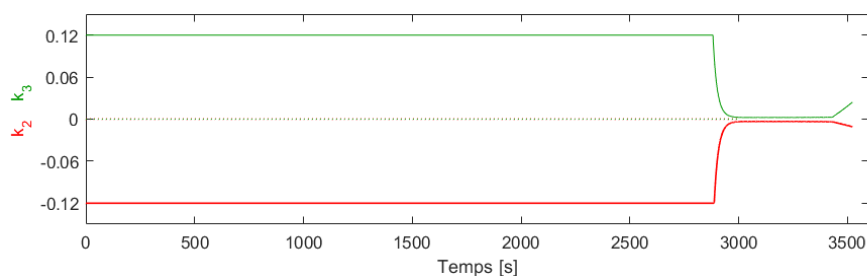


Figura 6.5 – Comparació de les accions de control a les proves del Cas 1 amb control (línies sòlides) i sense control (puntejades)

Per últim, a partir de les dades de tensió i corrent de les bateries i amb la potència capturada per l'oscil·loscopi, es poden representar les potències d'entrada i sortida (costats de contínua i alterna) de forma anàloga a tots els que s'han presentat fins ara.

A la Figura 6.6 es representen les dues potències pels dos casos diferents, i a part de la diferència de temps entre les desconexions, com a tots els altres gràfics que s'han presentat fins ara, en aquest també es pot veure la diferència entre el soroll de les mesures dels sensors passant pel ControlDesk i les de l'oscil·loscopi. Evidentment, les mesures preses cada segon són molt més sensibles, i presenten perturbacions fortes, però amb un nombre de dades de l'ordre de 3600 la tendència queda clara. Per la seva banda es mesures de l'oscil·loscopi estan capturades una cada 30 segons, i al estar més distanciades en el temps el Matlab simplement les uneix amb línies rectes i es veu un gràfic més net, tot i que realment hi ha 30 vegades menys dades (de l'ordre de 120). Com era d'esperar, en ambdós casos les potències d'entrada i sortida segueixen trajectòries gairebé perfectament paral·leles, resultant així en un rendiment gairebé constant i entorn al 95%. A més, al principi de la prova no hi ha diferències apreciables entre els casos amb control i sense control. La única diferència, per tant, és que amb el control activat les bateries triguen més a descarregar-se del tot fins a desconnectar-se, i tot aquest temps addicional (que augmenta l'àrea sota la corba de potència) és energia extreta guanyada gràcies al control.

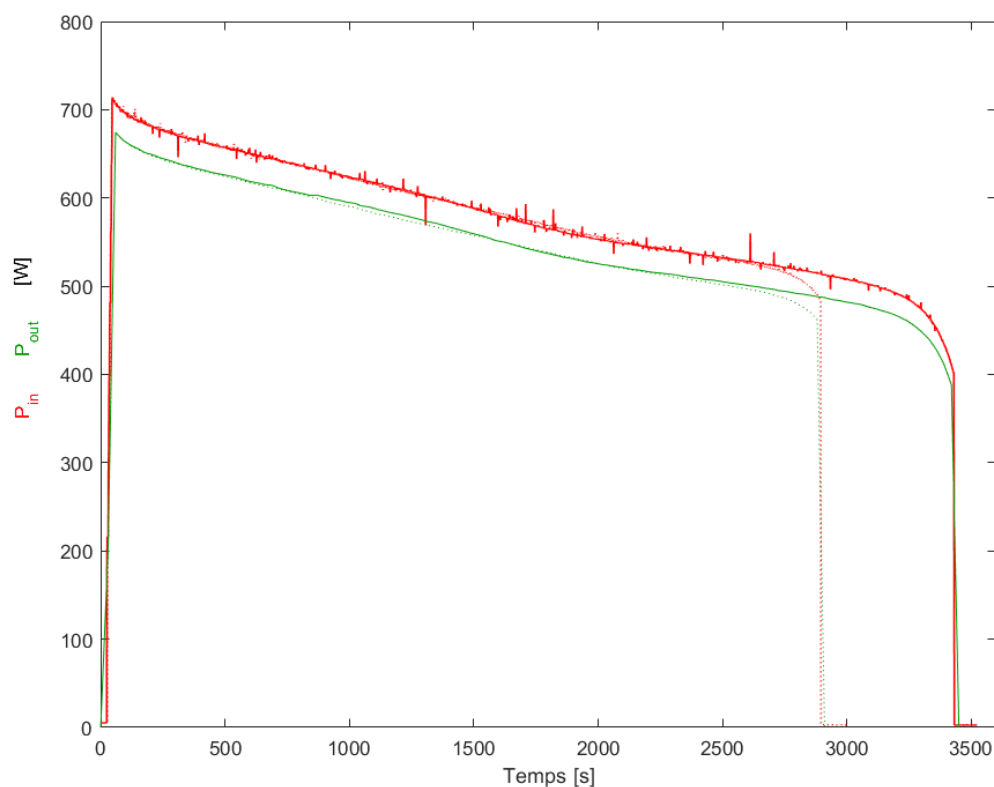


Figura 6.6 – Comparació de les potències a les proves del Cas 1, amb control (línies sòlides) o sense (puntejades)

6.2.2. Cas 2

Havent vist ja tots els gràfics pel Cas 1, en aquest punt només es mostraran els que presenten característiques que diferencien el Cas 2 de la resta, en concret els gràfics de corrents, SOCs i accions de control.

Anant per ordre, doncs, a la Figura 6.7 hi ha el gràfic de corrents per la segona repetició de les proves del cas 2, amb el mateix codi de colors i de tipus de línia que pel cas anterior. Els tres corrents de la prova sense control són pràcticament idèntics altre cop, fent que gairebé no es vegin ni les línies com a puntejades. Però el que més salta a la vista és la nova evolució dels corrents de la prova amb control enfront el temps. Hi ha dos trams clarament diferenciats, que es corresponen als canvis en les accions de control visibles a la Figura 6.8.

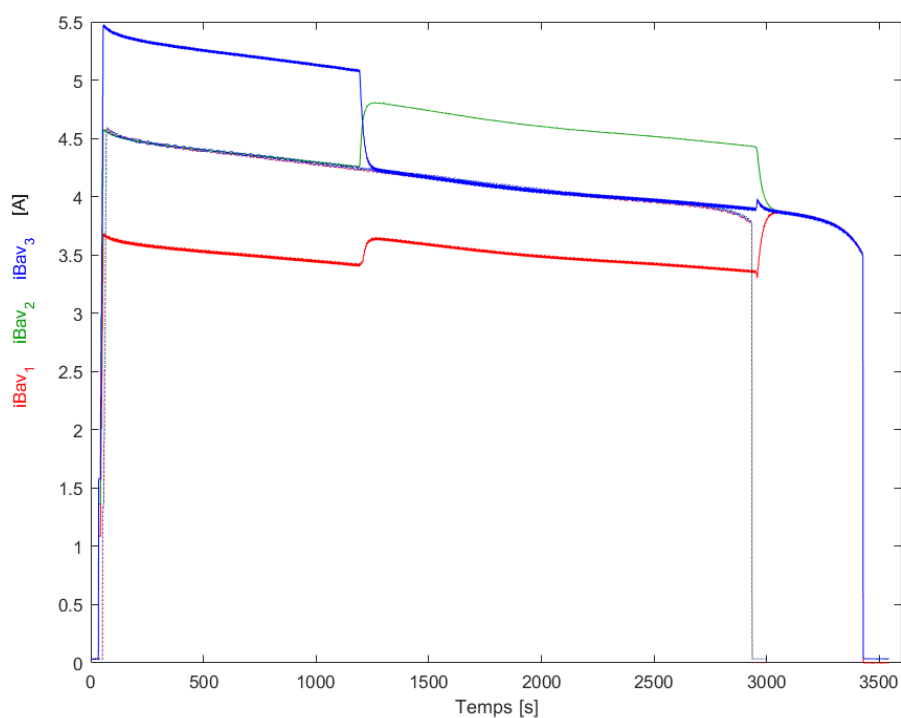


Figura 6.7 – Comparació dels corrents a les proves del Cas 2, amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

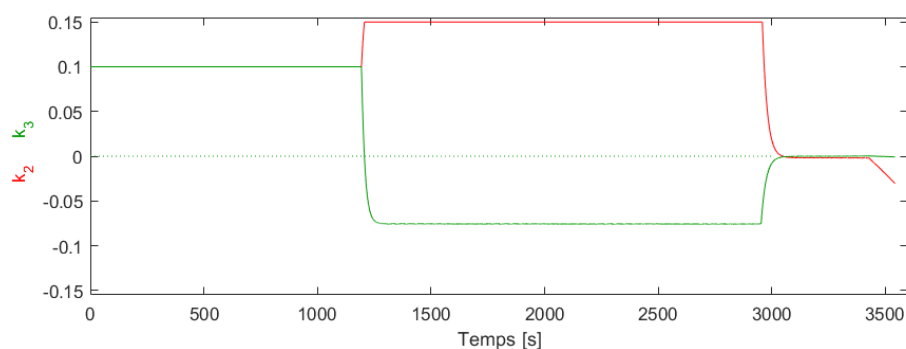


Figura 6.8 – Comparació de les accions de control a les proves del Cas 2 amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

El control busca equilibrar els estats de càrrega, i aquests canvis es produeixen per aconseguir-ho. A la Figura 6.9 es pot comprovar que els SOC's de la prova amb control activat arriben a igualar-se cap al final de la prova, però que l'evolució és diferent al Cas 1 fins a arribar-hi, ja que també s'hi poden observar els dos trams amb pendents diferenciats: primer la bateria 3 es descarrega més ràpid que la 2 i que la 1, que és la més lenta, fet que concorda amb els corrents vistos al primer tram. Després, els pendents canvien, i és la bateria 2 la que es descarrega més ràpidament que la 3 i que la 1, que segueix sent la més lenta, i altre cop concorda amb els resultats ja presentats. Aquestes diferències entre casos 1 i 2 ocorren perquè mentre que en el cas 1 era la bateria central la que estava menys carregada a l'inici, en el cas 2 és una bateria de l'extrem, en concret la 1 (però podria ser la 3 per simetria), i llavors el control per compensar-les totes tres és més complex i segueix aquests dos passos diferenciats.

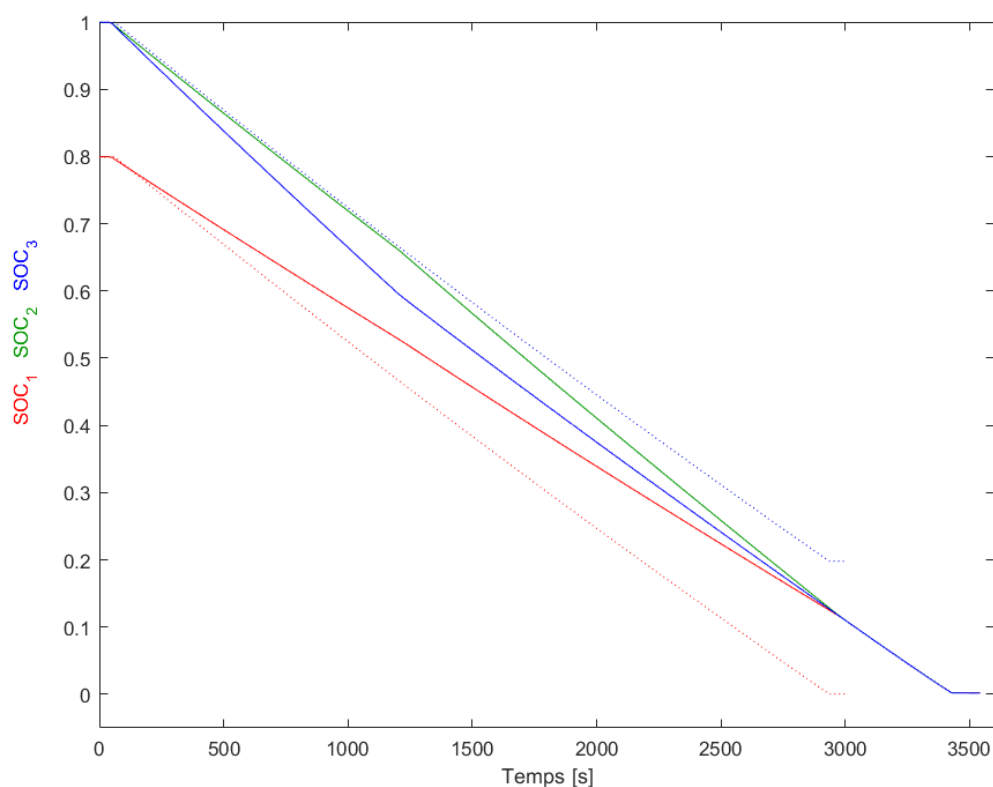


Figura 6.9 – Comparació dels SOC's a les proves del Cas 2, amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

No es mostren en aquest apartat els gràfics de tensions i potències perquè són totalment anàlegs als vistos en el cas 1, amb una evolució progressivament decreixent de les magnituds (les tensions s'equilibren amb control) fins que es desconnecta una bateria, i això passa uns 10 minuts abans pel cas sense control que pel cas amb control, el que suposa l'energia guanyada mostrada en les taules d'apartats anteriors.

6.2.3. Cas 3

L'últim cas és diferent a la resta, ja que totes tres bateries comencen completament carregades. En un món ideal això implicaria que el control fos totalment innecessari, i per tant resultats idèntics. Com no és el cas, petites diferències activaran el control, en principi per tal de corregir-les i aprofitar, ni que sigui mínimament, una mica més l'energia de les bateries.

A la Figura 6.10 es pot veure com els 3 SOC's són, a aquesta escala, totalment idèntics tant amb control com sense, i a la Figura 6.11 passa el mateix amb les potències.

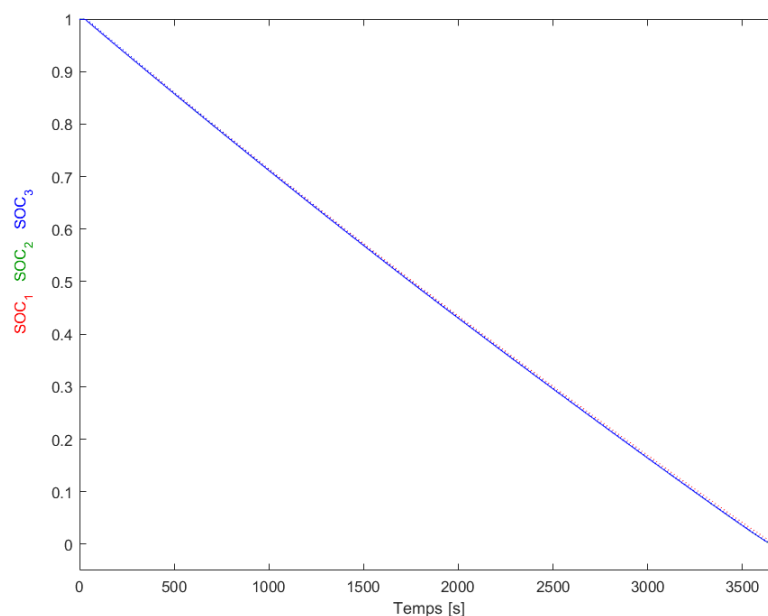


Figura 6.10 – Comparació dels SOC's a les proves del Cas 3, on totes les línies es solapen

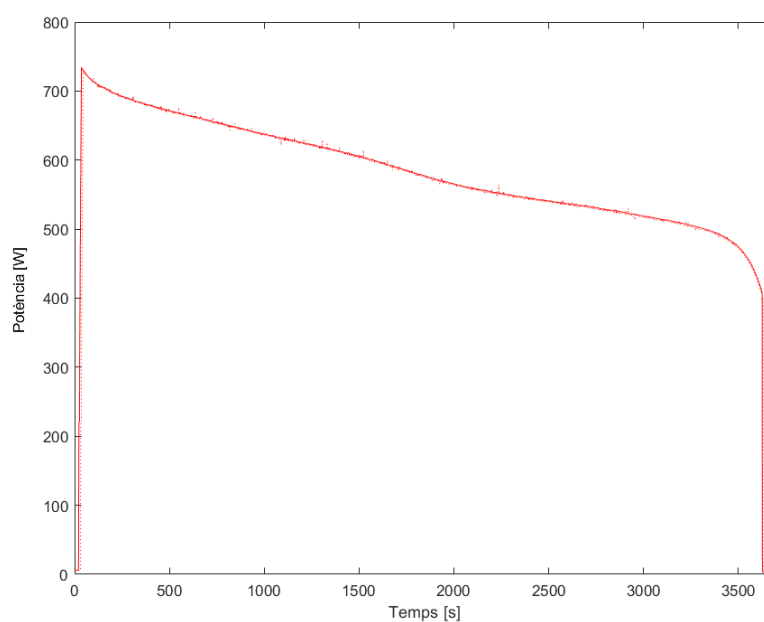


Figura 6.11 – Comparació de les potències a les proves del Cas 3, on les línies amb control i sense es solapen

En la resta de gràfics passa el mateix, les diferències són inapreciables amb la vista del gràfic sencer. Només fent moltes ampliacions successives es poden veure algunes diferències, com es mostra a la Figura 6.12, que mostra dues ampliacions de la Figura 6.11, una a l'inici de la prova i una altra al final. Es pot observar com la prova amb control es va iniciar als 20 segons de començar la gravació de dades, mentre que la prova sense control es va iniciar 10 segons més tard, i va acabar només uns 3 segons després que la prova amb control, i per això hi ha unes mínimes diferències en els valors de l'energia extreta, però com es pot veure, cal ampliar fins a uns extrems absurds per veure les diferències, que són de l'ordre de segons, i per tant poden dependre de la prova i les condicions de l'entorn a l'hora de realitzar-la.

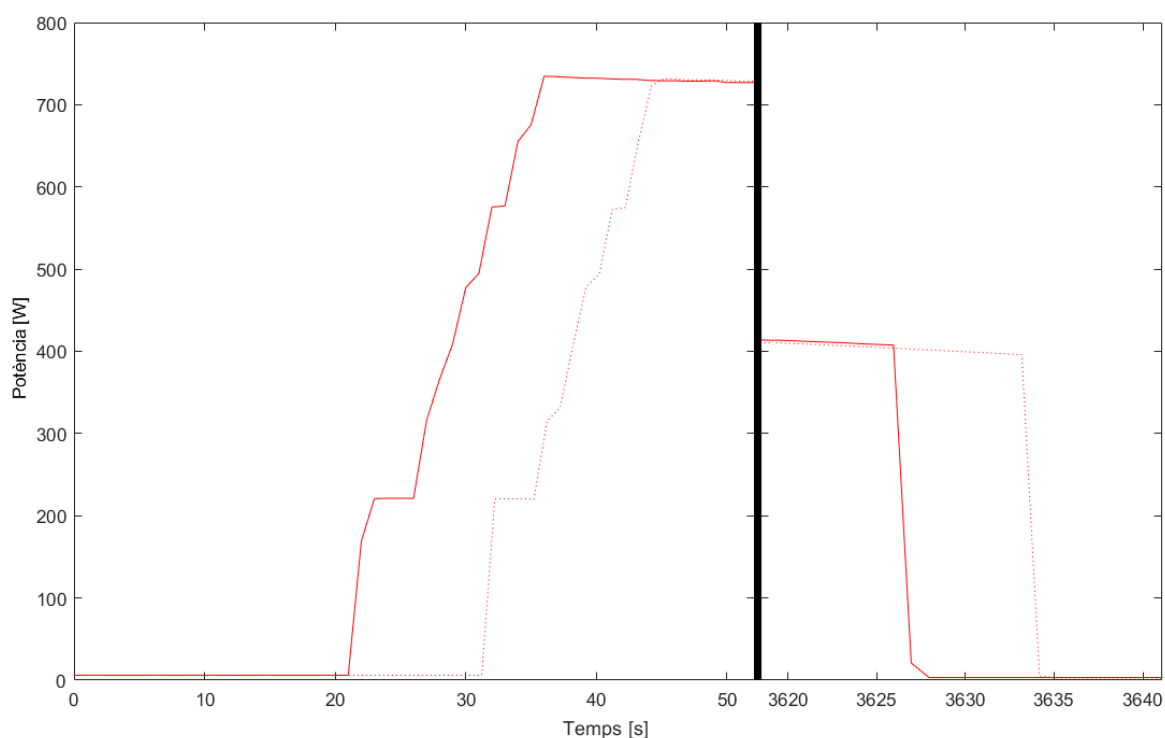


Figura 6.12 – Detalls a l'inici i al final dels gràfics de potència del Cas 3 amb control (línies sòlides) i sense (puntejades)

6.2.4. Efectes del soroll

Un dels problemes més importants que s'han afrontat al llarg de la realització de les proves ha estat el soroll provocat per interferències electromagnètiques als cables de mesura dels sensors de la part de contínua. A les primeres proves, el soroll era massa gran, i per això es va decidir posar filtres tant analògics com digitals a tots els sensors i mesures. Fins i tot amb aquests canvis, les mesures capturades seguien tenint oscil·lacions i pics, que van causar l'aturada prematura de dues de les proves en dos dies diferents, fins i tot sense tenir el control activat. Per això finalment es va decidir canviar també els cables dels sensors per uns en mode diferencial.

A la Figura 6.13 es pot veure una ampliació del gràfic de la Figura 6.3, que com s'ha dit no tenia les línies més gruixudes, sinó que les mesures oscil·len amb una amplitud pic a pic d'uns 0,03 Ampers per les bateries 1 i 3, i d'uns 0,01 A per la bateria 2. Aquest soroll és acceptable tenint en compte el valor total del corrent, i és amb el que es va treballar un cop posats els filtres.

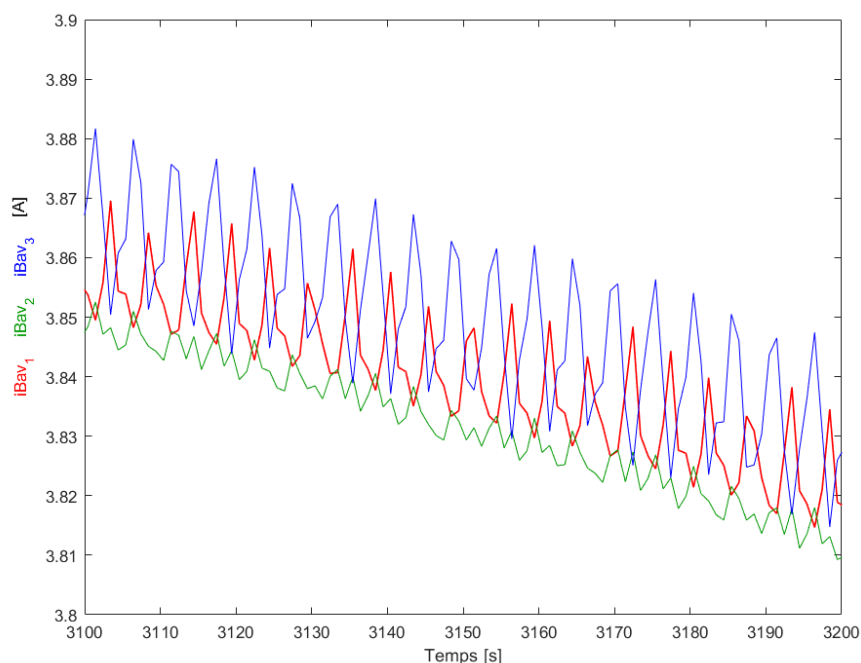


Figura 6.13 – Ampliació del gràfic de corrents pel Cas 1b

Per veure la diferència dels nous cables dels sensors en mode diferencial, es poden comparar dos gràfics abans i després del canvi. On es veu més clarament és sens dubte als gràfics de temperatura, com es pot comprovar a la Figura 6.14, ja que el soroll abans del canvi era molt important i amb els nous cables s'ha reduït moltíssim.

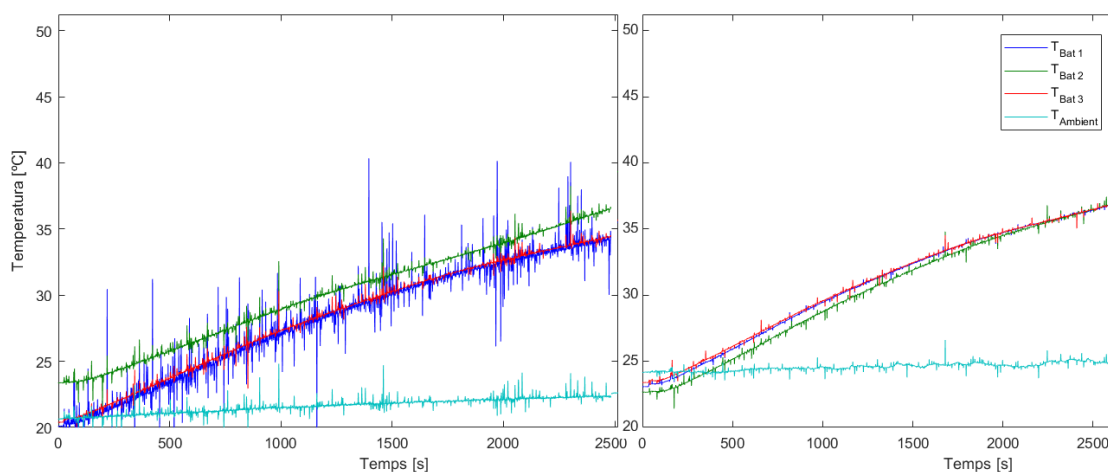


Figura 6.14 – Comparació dels gràfics de dades de temperatura abans i després de canviar els cables

Aquest soroll previ a canviar els cables va ser el causant de dues aturades prematures en dues proves diferents, fent saltar les alarmes de diferència màxima entre corrents fins i tot en un cas sense control on els corrents són pràcticament iguals. A la Figura 6.15 es poden veure les dades capturades a una prova fallida fins que es va aturar el sistema, amb un arrissat notable, però malauradament no es pot veure el pic de corrent que va causar l'aturada ja que les dades es capturen cada segon i aquest pic va ser instantani. Per evitar temporalment aquest problema, es va augmentar el rang de corrents permesos perquè fins i tot amb els pics ocasionals el sistema no s'aturés, buscant una solució de compromís amb la necessitat que el rang sigui prou estret com perquè el sistema s'aturi si hi ha algun problema de veritat.

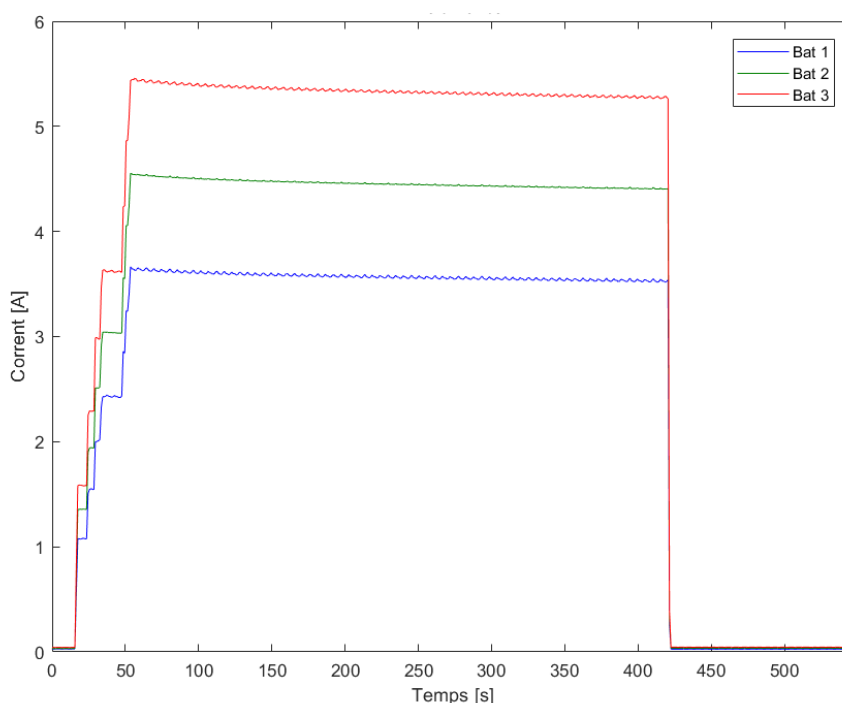


Figura 6.15 – Gràfic dels corrents de la prova del cas 2b que va aturar-se per un error

6.2.5. Efectes de la Temperatura

Per altra banda, es va veure a les primeres proves que carregar i descarregar les bateries sense deixar-les reposar, iniciant així les proves amb temperatures més elevades, tenia una clara repercussió a l'hora de realitzar les proves, ja que aquestes no acabaven quan la bateria més descarregada (o una de les tres en el cas amb control) arribava a descarregar-se completament, sinó que la bateria es desconnectava quan encara hi quedava un 2% o 3% de càrrega.

Aquesta càrrega romanent no era acceptable, ja que es perdia molta energia a les bateries. A la Figura 6.16 es poden observar els SOC's de la segona prova realitzada, el cas 1b, i es veu clarament com la prova s'atura i no s'arriba al 0. Aquesta prova no es va considerar correcta, i es va repetir deixant reposar les bateries d'un dia per l'altre, obtenint resultats correctes (s'acceptaren SOC's finals com a molt fins al 1%, degut a possibles errors de mesura, però gairebé sempre es baixava d'aquest valor abans de l'aturada), com es pot veure a la comparació de la Figura 6.17 (els estats de càrrega de totes tres bateries estan completament solapats per ambdós proves), i per tant es va decidir deixar reposar les bateries després de cada càrrega.

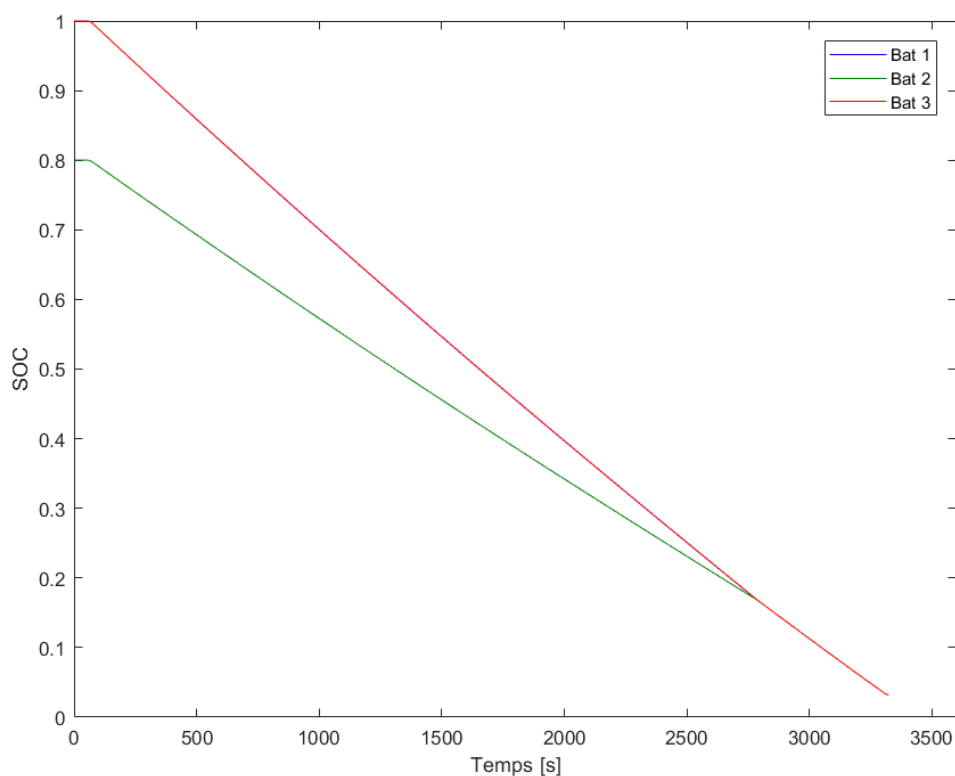


Figura 6.16 – Gràfic dels estats de càrrega a la primera prova 1b, on els SOC's no arriben a 0

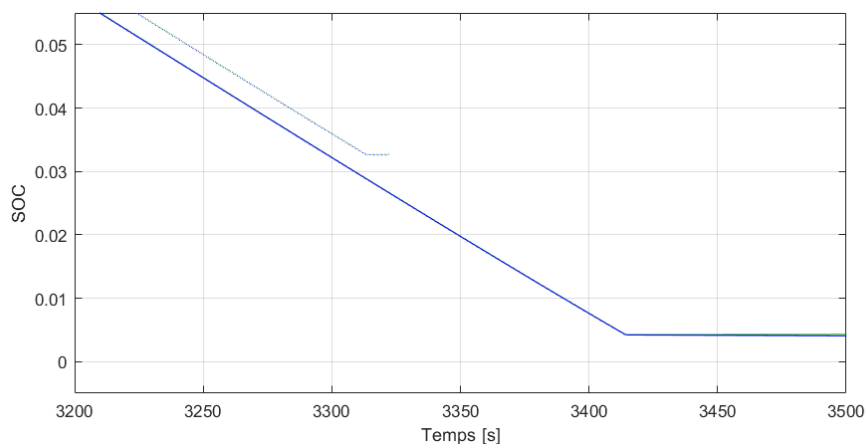


Figura 6.17 – Comparació dels SOC's al final de les proves del cas 1b amb repòs (línia sòlida) o sense (puntejada)

6.3. Comparació amb les simulacions

Per acabar amb l'anàlisi de resultats, es poden comparar els resultats experimentals amb les simulacions dutes a terme pel GREP, que formen part de la recerca en la que s'ha col·laborat. Per no repetir i no entrar en un territori on no s'ha treballat (control del convertidor, modulació i simulacions al *Simulink*), simplement s'adjunten els gràfics de la Figura 6.18, corresponents a corrents i SOC's de les simulacions del Cas 1, on es pot comprovar que l'aspecte és exactament igual a l'obtingut en els experiments, si bé amb línies molt més netes ja que les simulacions no tenen soroll. A la Taula 6.4 també es poden veure alguns resultats numèrics a mode de comparació entre les energies totals extretes de les bateries en els dos primers casos amb control i sense. Com es pot veure, en tots els casos les simulacions donen uns 10 W·h més que els resultats experimentals, però la diferència entre activar o no el control és aproximadament del 15% en tots els casos, validant les simulacions i també l'eficàcia del control alhora.

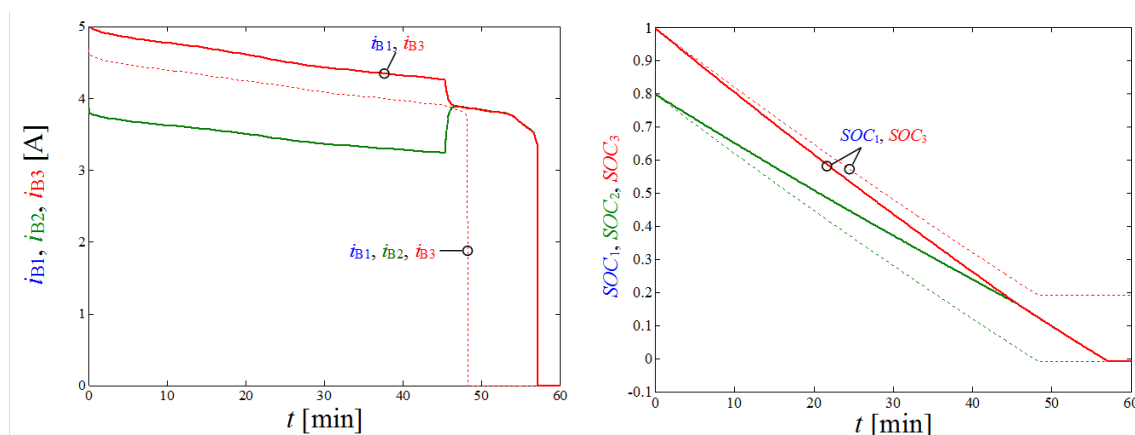


Figura 6.18 – Gràfics dels resultats de les simulacions del Cas 1 elaborats pel GREP

Cas	$E_{DC, \text{sim.}} [\text{W}\cdot\text{h}]$	$E_{DC, \text{exp.}} [\text{W}\cdot\text{h}]$
1a	482	472
1b	554	545
2a	481	473
2b	554	544

Taula 6.4 – Comparació de les energies extretes entre simulacions i experiments

7. Pressupost

En aquest capítol es presenten breument els costos totals del treball. Com aquest ha consistit en una part de programació i una altra de suport al Grup de Recerca en Electrònica de Potència, dins de les instal·lacions del Departament d'Enginyeria Electrònica, on tot el material i components necessaris per fer les tasques de suport han sigut facilitats, no té sentit parlar de costos de material ni amortització, ja que aquest treball seria equivalent a contractar un enginyer extern per facilitar la feina donant-li tots els materials i equips que ha d'usar, i aquest enginyer no cobraria a l'entitat contractant ni materials ni l'amortització dels equips usats, ni tan sols el consum elèctric, ja que no els ha pagat ell. Per tant, es considera que tots aquests costos són del projecte de recerca del GREP però no formen part del pressupost d'aquest treball.

Així doncs, el cost principal és el de recursos humans, concretament el sou d'un enginyer contractat per ajudar en el projecte. Els Treballs de Final de Grau tenen 12 Crèdits ECTS associats, i cada un comporta 30 hores de treball [10], resultant en un total de 360 hores treballades. Amb el sou d'un enginyer acabat de titular, cas que s'assumeix per fer el pressupost, s'obtenen els resultats de la Taula 7.1.

	Temps dedicat [h]	Cost per hora [€/h]	Cost total [€]
Treball d'enginyer	360	20	7200

Taula 7.1 – Pressupost del treball

8. Impacte ambiental

Durant el període de durada d'aquest treball, i degut a la seva naturalesa, no s'ha dut a terme cap activitat directament contaminant al medi ambient.

Tots els components utilitzats compleixen amb la normativa RoHS (*"Restriction of Hazardous Substances"*, directiva 2002/95/CE [11]) de la Unió Europea, que prohibeix l'ús de certs elements nocius als aparells elèctrics i electrònics, en concret el Plom, a tots els elements fabricats a partir de l'aplicació de la norma, però no obliga a la retirada d'elements fabricats anteriorment encara que continguin aquests elements.

Per altra banda, a l'haver usat energia elèctrica, cal tenir en compte les emissions de CO₂ produïdes al generar aquesta energia. Segons els factors d'emissió oficials aprovats pel Govern d'Espanya [12], es considera que es generen 0,357 kilograms de CO₂ per cada kWh consumit. Entre totes les proves s'han consumit 7200 Wh de les bateries, que s'han hagut de carregar amb la xarxa elèctrica anteriorment, i a més cal sumar el consum dels ordinadors usats durant el treball, que com han estat encesos pràcticament a la totalitat de la seva durada, es pot dir que han consumit uns 100 W durant 360 hores, és a dir, 36 kWh, augmentant el total d'energia consumida fins als 43,2 kWh i per tant les emissions de CO₂ fins a un total de 15,42 kg.

Però també cal considerar l'efecte final del projecte de recerca en el que s'emmarca aquest treball, que és el major aprofitament de l'energia de les bateries en un cotxe elèctric, i per tant, a la llarga, la reducció d'emissions per generació de la pròpia energia elèctrica i, al fer avançar el camp del vehicle elèctric, també reduir les emissions provocades per vehicles tradicionals amb motors de combustió.

Conclusions

Durant el transcurs d'aquest treball s'han realitzat els programes de captura automàtica de dades i de processat dels resultats, s'ha col·laborat amb el GREP per deixar el banc de proves funcional, i s'han dut a terme les proves representatives per comprovar l'efectivitat del control proposat al projecte de recerca real en el que s'emmarca el treball.

Comparant el treball realitzat amb els objectius, es pot arribar a la conclusió que el treball ha sigut tot un èxit, ja que s'han complert tots i alguns fins i tot amb millores respecte el que s'havia plantejat.

Primer de tot, el programa de captura de dades de l'oscil·loscopi és totalment accessible, permet interacció amb l'usuari amb una interfície gràfica amable i intuïtiva, permet aturar la captura en qualsevol moment, i també la sincronització amb el *ControlDesk* i les captures del costat de contínua. El propi espai de treball del *ControlDesk* s'ha editat per tenir més prestacions, i finalment s'han pogut capturar imatges tèrmiques des de l'ordinador actualitzant la càmera i amb el programa existent.

Per altra banda, s'han implementat tots els elements necessaris i realitzat totes les modificacions pertinents per deixar el banc de proves operatiu, corregint els errors que apareixien en el transcurs natural del projecte i col·laborant amb el GREP en el que era necessari. Les proves finalment han sigut un èxit, s'han pogut fer totes amb normalitat i cap sistema ha fallat en el procés, només hi ha hagut alguns errors humans i aturades prematures per restriccions massa estrictes en els límits de seguretat, que simplement han fet enrederir la finalització de les proves un parell de dies però no han comportat ni danys ni cap conseqüència negativa greu.

Finalment, el programa de processat de dades per representar els resultats de forma gràfica ràpidament al final de cada prova ha sigut un èxit, i el registre automàtic dels resultats més importants és una funcionalitat afegida molt útil de cara al futur. A més, per l'elaboració d'aquest document també s'ha programat una sèrie de comandes per facilitar la representació dels resultats de dues proves alhora, per fer comparacions del mateix cas amb control o no, o dels resultats abans i després de canviar algun element, per exemple.

La realització d'aquest treball, a més, ha comportat aspectes de formació acadèmica a l'autor, com la comprensió, encara que bàsica, dels convertidors multinivell, en especial de la família NPC i de la topologia EMAC, un primer contacte amb el seu control, que tot i no formar part del treball se n'ha parlat i investigat fruit del contacte natural i la curiositat de l'autor, un domini molt major del *Matlab*, en especial el descobriment de noves funcionalitats com els

objectes per fer interfícies amb l'usuari o les variables del tipus *Struct*, l'enteniment bàsic del funcionament de la *dSpace* i el *ControlDesk*, en especial de com mostrar i enregistrar dades, i també un primer tast de què és la recerca, els reptes que proposa i el dia a dia per aconseguir avançar solucionant els problemes que poden anar sorgint fins arribar a l'anàlisi de resultats. A més, ha mostrat una visió més detallada i pràctica de l'electrònica, en concret en el camp de l'electrònica de potència, que es toca molt per sobre en l'assignatura del Grau.

Per acabar, es pot fer una mirada al futur per proposar possibles millores i treball que es podria fer si es seguís amb aquest camp. Primer de tot, sempre es podrien afegir funcionalitats als programes de captura i processat de dades, però en concret el primer que es podria fer és que el programa de captura de dades creés el directori de la prova amb el nom indicat per l'usuari, i es desessin tots els fitxers a dins, i llavors amb un simple botó s'indiqués si es volen generar els gràfics immediatament a l'acabar la prova o no. Això facilitaria immensament l'ús del programa i evitaria haver de copiar i enganxar els fitxers de dades dels diferents programes a un directori comú, a més d'estalviar el temps de canviar de directori i executar el programa de processat. Per altra banda, des del GREP també s'ha programat un segon tipus de control per equilibrar les bateries i aprofitar més la seva energia. El control emprat equilibra els estats de càrrega, i per fer-ho necessita dades del corrent a cada instant, però l'alternativa és un control directament per la tensió de les bateries, que possibilitaria l'eliminació dels sensors de corrent i simplificaria el sistema, a més d'abaratir costos si aquest prototip finalment s'incorporés en vehicles elèctrics.

Agraïments

Aquest treball no estaria complet sense recordar i agrair a tothom que m'ha ajudat durant el seu transcurs.

Primer de tot, gràcies als meus directors, en Sergio Busquets i l'Àlber Filbà, per la seva atenció, ajuda i empenta sempre que ha fet falta, i per estar sempre disponibles i disposats a resoldre qualsevol dubte o fer alguna explicació addicional, i per no cansar-se mai de les meves preguntes. En aquest sentit, he d'agrair també al Joan Nicolás, membre del GREP que tot i no tenir cap responsabilitat directa sobre aquest treball, ha sigut igual d'atent i disponible com els directors. A tots ells els dec gran part de la informació i suport del treball, i també he compartit molt de temps durant aquests mesos, m'han mostrat una nova visió de la recerca i m'han fet sentir com un més del grup.

També vull agrair als meus companys del grau, concretament al Pedro, a l'Albert i en especial a la Maria, per fer que tant el temps d'aquest projecte com tota la carrera hagi sigut molt més amena, compartint tot tipus de moments, donant suport i ànims, i sent una companyia inestimable.

Als meus amics Marc, Alberto, Aleix, Quel i Jaume, per tot el suport i les converses, les tardes i nits de llargues xerrades, interessar-se pel treball i sobretot entendre que no pogués quedar amb ells molts cops per estar al laboratori.

Finalment, també vull agrair el suport dels meus pares i la meva àvia, que han mostrat interès i suport sempre que m'ha fet falta, i han fet que els dies de redacció no fossin tan durs.

A tots moltíssimes gràcies.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] BUSQUETS-MONGE, S.; *Neutral-Point-Clamped DC-AC Power Converters*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, preprint version.
- [2] BUSQUETS-MONGE, S.; CABALLERO, L.; *Switching-cell arrays – An alternative design approach in power conversion*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, preprint version.
- [3] TEKTRONIX, INC.; *MSO3000 and DPO3000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes Programmer Manual* [Consulta: Març 2018]. Disponible a: <<http://download.tek.com/manual/MSO3000-and-DPO3000-Programmer-Manual.pdf>>
- [4] MATHWORKS, INC.; *Documentation* [Consulta: Febrer-Juny de 2018]. Disponible a: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>>
- [5] DSPACE, GMBH.; *ControlDesk Next Generation Guide*; Alemanya, 2011.
- [6] KEYSIGHT TECHNOLOGIES; *U5850 Series TrueIR Thermal Imagers Data Sheet* [Consulta: Març 2018]. Disponible a: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-4297EN.pdf>>
- [7] KEYSIGHT TECHNOLOGIES; *Keysight U5850 Series Firmware Revision History* [Consulta: Març 2018]. Disponible a: <<https://goo.gl/JCNBRX>>
- [8] KEYSIGHT TECHNOLOGIES; *Keysight U5850 Series Firmware Upgrade Procedures* [Consulta: Març 2018]. Disponible a: <<https://goo.gl/XShp9y>>
- [9] DSPACE, GMBH.; *DS5101 Board Reference (Document version 1.2.1)*; Alemanya.
- [10] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA; *Preguntes més freqüents sobre els estudis de grau* [Consulta: Juny 2018]. Disponible a: <http://www.upc.edu/ca/graus/acces-i-admissio/faqs-estudis-grau#credits_ects>
- [11] PARLAMENT EUROPEU; *Directiva 2002/95/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos* [Consulta: Juny 2018]. Disponible a: <<https://www.boe.es/doue/2003/037/L00019-00023.pdf>>
- [12] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO; *Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España* [Consulta: Juny 2018]. Disponible a: <<https://goo.gl/xyQHT1>>

Bibliografia complementària

BUSQUETS-MONGE, S. *Et al.*; *The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter*; IEEE Power Electronics Letters, Vol.2 No.1, March 2004

TEKTRONIX, INC.; *MSO3000 and DPO3000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes User Manual* [Consulta: Març 2018]. Disponible a:

<<http://download.tek.com/manual/071265602web.pdf>>

DSPACE, GMBH.; *DS2004 Board Reference*; Alemanya; dSpace 2003.

DSPACE, GMBH.; *ControlDesk Next Generation Reference*; Alemanya, 2011.

