



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'energia

**CONTROL TÀCTIC PER A EMULACIÓ DE
SUPERCONDENSADOR BASAT EN FONT
PROGRAMABLE DE DOS QUADRANTS**



Memòria i Annexos

Autor: Mateusz Grzegorz Sobieraj
Director: Francesc Xavier Roset Juan
Convocatòria: Octubre 2018

Resum

En el present projecte s'ha programat un simulador de supercondensador capaç d'imitar el comportament d'aquest dispositiu seguint una modelització normalitzada. Aquest simulador s'ha creat en un dels laboratoris de l'escola, concretament en l'E3PACS.

En primer lloc, s'ha realitzat una explicació sobre aquests dispositius. Posteriorment, s'han explicat els diferents elements que s'han utilitzat per a programar aquest simulador i com s'ha realitzat aquesta simulació mitjançant diferents Softwares, principalment amb l'ús del LabVIEW. Després, s'han plasmat els diferents experiments amb els que s'ha treballat i finalment, s'han contrastat els resultats obtinguts, els quals han sigut favorables.

El projecte, el qual ha tingut un caire molt pràctic, ha servit per una banda per a posar en marxa i veure les capacitats dels nous equips del laboratori, i per una altra banda per ampliar els coneixements respecte als supercondensadors i el seu ús per a l'emmagatzematge de l'energia.

Resumen

En el presente proyecto se ha programado un simulador de supercondensador capaz de imitar el comportamiento de este dispositivo siguiendo una modelización normalizada. Este simulador se ha creado en uno de los laboratorios de la escuela, concretamente en el E3PACS.

En primer lugar, se ha realizado una explicación sobre estos dispositivos. Posteriormente, se han explicado los diferentes elementos que se han utilizado para programar este simulador y como se ha realizado esta simulación mediante diferentes Softwares, principalmente con el uso del LabVIEW. Después, se han plasmado los diferentes experimentos con los que se ha trabajado y finalmente, se han contrastado los resultados obtenidos, los cuales han sido favorables.

El proyecto, el cual ha tenido un carácter muy práctico, ha servido por un lado para poner en marcha y ver las capacidades de los nuevos equipos del laboratorio, y por otro lado para ampliar los conocimientos respecto a los supercondensadores y su uso para el almacenamiento de la energía.

Abstract

In the present project, a supercapacitor simulator has been made, capable of reproducing the behaviour of this device following a standardized modelling. This project has been made in one of the laboratories of the school, concretely in the E3PACS.

First, an explanation has been made about these devices. Subsequently, the different elements that have been used to make this simulator have been explained and how this simulation has been done through different Softwares, mainly with the use of LabVIEW. Afterwards, the different experiments performed have been showed and finally, the obtained results have been contrasted, which have been favourable.

The project, which has had a very practical nature, has served for one side to start up and see the capabilities of the different new equipment that have arrived in the laboratory, and on the other hand to expand knowledge about supercapacitors and its use for energy storage.



Agraïments

Vull mostrar el meu agraïment a tot l'equip del laboratori E3PACS, l'ajuda, paciència i companyia del qual ha sigut essencial per a la realització del projecte.

També vull agrair la meva família i els meus amics, que sempre han estat allà.

I per últim, a Adrián, per cada dia.





Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
1. INTRODUCCIÓ	9
1.1. Objectius del treball	9
1.2. Abast del treball	9
2. EL SUPERCONDENSADOR	11
2.1. Història	11
2.2. Disseny bàsic del supercondensador	12
2.3. Principis d'emmagatzematge en els supercondensadors.....	14
2.3.1. Capacitat de doble capa.....	14
2.3.2. Pseudocapacitat:	16
2.4. Classificació dels supercondensadors:.....	17
2.5. Materials usats per als supercondensadors	18
2.5.1. Elèctrodes	18
2.5.2. Electròlits.....	22
2.5.3. Separadors	23
2.5.4. Col·lectors i Carcassa.....	24
2.6. Característiques dels supercondensadors:.....	24
2.6.1. Capacitat:	24
2.6.2. Tensió de funcionament	25
2.6.3. Corbes de càrrega i descàrrega	25
2.6.4. Estat de càrrega (SOC) i Profunditat de descàrrega (DOD)	26
2.6.5. La resistència interna.....	27
2.6.6. Capacitat energètica i potencial.....	27
2.6.7. Esperança de vida.....	29
2.6.8. Autodescàrrega	31
2.6.9. Polaritat.....	32
2.6.10. Connectivitat dels supercondensadors en sèrie i en paral·lel.....	32
3. ELEMENTS PER A L'EMULACIÓ DEL SUPERCONDENSADOR	34
3.1. Elements físics	34
3.1.1. Font de potència programable de CC, Regatron TC.GSS	34

3.1.2.	Càrrega electrònica programable de CA i CC, Adaptive Power	41
3.1.3.	Font d'alimentació	46
3.2.	Software	46
3.2.1.	TopControl	46
3.2.2.	APS AC/DC Load Gui.....	47
3.2.3.	LabVIEW	¡Error! Marcador no definido.
4.	MODELITZACIÓ DEL SUPERCONDENSADOR	50
5.	SIMULADOR	53
5.1.	Explicació del codi	59
5.2.	Muntatge	61
5.3.	Passos a seguir per una correcta simulació	63
6.	SIMULACIONS REALITZADES AL LABORATORI	64
6.1.	Escenari 1. Càrrega.....	64
6.2.	Escenari 2. Càrrega.....	66
6.3.	Escenari 3. Descàrrega.....	67
6.4.	Escenari 4. Descàrrega.....	70
6.5.	Escenari 5. Descàrrega.....	72
7.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	77
	CONCLUSIONS	79
	PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	81
	BIBLIOGRAFIA	83
	ANNEX A	88
	ANNEX B	89

1. Introducció

Probablement, una de les preocupacions més grans del segle XXI sigui l'abastiment energètic. En un món on s'estan acabant els recursos energètics tradicionals i on s'han de donar respostes a mig termini a aquesta situació, és indispensable el treball en la recerca de noves fonts d'energia, però també del seu emmagatzematge i la seva distribució, d'entre altres.

Aquesta ha sigut la motivació que ha donat pas a aquest treball. En aquest s'estudia i es simula un dels elements que mes força està agafant en els últims anys per a l'emmagatzematge energètic, el supercondensador.

1.1. Objectius del treball

El principal objectiu del treball és la programació d'un simulador de supercondensador basat en la modelització d'aquest. També s'ha volgut augmentar els coneixements respecte aquest dispositiu, per tal de veure el seu potencial.

Finalment, també cal destacar la posada en marxa i l'estudi del funcionament dels diferents equips del laboratori que s'han usat per a assolir l'objectiu principal.

1.2. Abast del treball

El treball consta d'una primera part on es realitza l'explicació teòrica sobre el supercondensador i una segona part on es realitza la seva aplicació pràctica, la simulació. Per a la simulació s'han estudiat els elements i softwares necessaris, la relació i comunicació entre els diferents dispositius i la modelització del supercondensador. S'ha verificat correcte el funcionament del simulador mitjançant la realització de les corbes de càrrega i descàrrega d'un supercondensador.

S'ha volgut treballar sobretot l'assoliment d'aquest simulador, i a les conclusions es proposen les millores que es poden realitzar i les diverses aplicacions i simulacions que es poden dur a terme amb aquest en un futur.

2. El supercondensador

Un supercondensador és un condensador d'alta capacitat capaç de sustentar típicament entre 10 i 1000 cops més l'energia per unitat de volum o massa que un condensador electrolític.

Mentre que els condensadors típicament tenen capacitats de desenes de milifarads (mF), un supercondensador de la mateixa mida pot arribar a tenir una capacitat d'uns quants farads.

Els supercondensadors comercials de major mida tenen capacitats molt elevades, de fins a 5000F. En les últimes investigacions s'han arribat a obtenir supercondensadors de 10000F. [1]

2.1. Història

La història dels supercondensadors és recent, donat que aquests dispositius són una evolució dels condensadors electrolítics i el interès sobre aquests s'ha despertat recentment. Va ser a principis de la dècada dels anys 50, quan els enginyers de General Electric van començar a experimentar amb elèctrodes de carboni porosos en el disseny de supercondensadors a partir dels dissenys de piles de combustible i bateries recarregables.

El carbó actiu és un conductor elèctric amb una forma de carboni extremadament porós amb una àrea superficial específica alta. L'any 1957, H. Becker va desenvolupar un condensador electrolític de baixa tensió amb elèctrodes de carboni porós. Ell creia que l'energia s'emmagatzemava com una càrrega als porus del carboni i a les làmines d'alumini del condensador. Degut a què el mecanisme de doble capa no era conegut per ell en aquell moment, va escriure en la patent: "No se sap exactament que està passant interiorment en el component si s'usa per a emmagatzematge d'energia, però condueix a una capacitat extremadament alta". [2]

L'any 1966, els investigadors de Standard Oil of Ohio van desenvolupar el primer supercondensador comercial amb una interfície de carboni i solució electrolítica de sal de tetralquilamoni. Tot i això, SOHIO no va comercialitzar el seu invent, llicenciant la tecnologia a NEC (una companyia elèctrica japonesa). Aquesta última finalment va començar a comercialitzar el producte sota la denominació de "supercondensador" l'any 1971, amb l'objectiu de donar recolzament energètic a les memòries dels ordinadors. [3]

A finals dels anys 80, l'investigador Brian Evans Conway va dur a terme un extens treball fonamental i de desenvolupament sobre condensadors electroquímics d'òxid de ruteni. L'any 1991, va descriure la diferència entre el comportament del supercondensador i les bateries respecte l'emmagatzematge d'energia electroquímica. Durant els anys 90, les seves investigacions van ampliar enormement els coneixements sobre aquests dispositius. [4]

Durant els anys 80, companyies com Maxwell Technologies, Siemens, Epcos i Panasonic van començar a realitzar els seus propis dissenys i investigacions.

L'energia continguda en un condensador augmenta amb el quadrat del voltatge, per la qual cosa els investigadors van buscar una manera d'augmentar el voltatge de ruptura de l'electròlit. Per exemple, l'any 1994 David A. Evans va desenvolupar un supercondensador amb un contingut d'energia 5 cops major que la d'un supercondensador de la mateixa mida. Els seus alts costos van limitar la producció d'aquest a aplicacions militars específiques. [5]

Les últimes investigacions inclouen supercondensadors d'ions de liti, carboni i grafè, entre d'altres materials. Els departaments d'investigació d'empreses i universitats estan treballant per millorar les característiques dels supercondensadors, com ara l'energia específica, l'estabilitat del cicle de càrrega i descàrrega, la potència específica i la reducció de costos de producció. [6]

2.2. Disseny bàsic del supercondensador

Donat que els supercondensadors són una evolució dels condensadors electrolítics convencionals, és convenient parlar primerament sobre el disseny d'aquests últims.

Aquests condensadors estan formats per dues plaques anomenades elèctrodes separats per una membrana permeable als ions i un electròlit que les connecta de forma iònica.

Una diferència de potencial apareix quan el dispositiu es connecta a un camp elèctric, cosa que provoca la polarització del medi dielèctric, i fa que s'acumuli càrrega positiva en una banda d'aquest i càrrega negativa a la banda oposada.

L'energia emmagatzemada als condensadors és de naturalesa electrostàtica i depèn principalment de la diferència de potencial entre els dos elèctrodes.

En els supercondensadors, els elèctrodes estan recoberts per un material porós que dona lloc a una àrea major de les plaques i una major capacitat. Entre els elèctrodes, en lloc d'un dielèctric, hi ha un líquid electrolític i una membrana permeable al pas dels ions anomenada separador. Aquesta membrana s'usa com a aïllant ja que protegeix als elèctrodes dels curtcircuits. L'electròlit immers en els porus dels elèctrodes serveix com connexió elèctrica entre aquests a través del separador.

Dos col·lectors metàl·lics envolten aquesta estructura i tot el conjunt s'enrotlla a l'interior d'una carcassa cilíndrica, que es fabrica normalment amb alumini. Tot el conjunt s'ha de segellar de forma hermètica per tal d'assegurar un producte fiable i estable, assegurant les característiques del supercondensador.

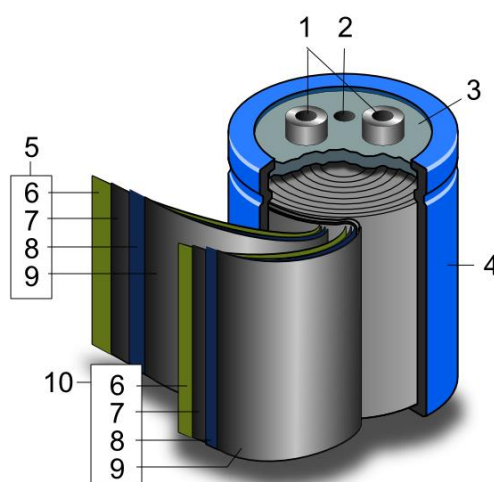


Fig. 1. Detalls constructius del supercondensador. Font: Tosaka Creative Commons.

A la figura superior podem apreciar els detalls constructius del supercondensador. En aquesta imatge tenim els elements següents:

- 1. Terminals
- 2. Ventilació
- 3. Disc de segellat hermètic.
- 4. Carcassa d'alumini.
- 5. Pol positiu.
- 6. Separador
- 7. Elèctrode
- 8. Col·lector
- 9. Elèctrode.
- 10. Pol negatiu.

2.3. Principis d'emmagatzematge en els supercondensadors

El fenomen més característic dels supercondensadors és l'anomenat l'efecte de doble capa elèctrica, el descobriment del qual s'atribueix normalment a H. Helmholtz l'any 1879. Va tractar la doble capa elèctrica des d'un punt de vista matemàtic com un condensador, basat en un model físic en el que una capa d'ions és adsorbida a la superfície de l'elèctrode. La doble capa elèctrica és l'estructura que comprèn la regió d'interfase. En el cas dels supercondensadors aquesta succeeix en la interfase elèctrode-electròlit. [7]

Existeixen dos mecanismes d'emmagatzematge a la doble capa elèctrica dels elèctrodes que contribueixen a la capacitat total d'un supercondensador:

- **Capacitat de doble capa:** és l'emmagatzematge electrostàtic de l'energia elèctrica produïda per la separació de la càrrega a la doble capa de Helmholtz.[8]
- **Pseudocapacitat:** emmagatzematge electroquímic d'energia obtinguda mitjançant reaccions redox faràdiques amb transferència de càrrega. [9]

La càrrega emmagatzemada en els supercondensadors és principalment funció de la mida dels elèctrodes, tot i que la forma amb la qual influeixen els mecanismes d'emmagatzematge en els supercondensadors pot modificar el seu valor substancialment.

A continuació es descriuran els dos mecanismes descrits anteriorment amb més profunditat per entendre millor el funcionament dels supercondensadors i com aquests es poden usar per l'emmagatzematge energètic.

2.3.1. Capacitat de doble capa

Per a explicar la capacitat de doble s'ha de veure primer de que està compost qualsevol tipus de condensador electroquímic. Aquest, com ja s'ha explicat, està format per dos elèctrodes, separats mecànicament per un separador i connectats de forma iònica a través de l'electròlit. L'electròlit és una dissolució de cations i anions en un medi aquós o orgànic.

A cadascuna de les superfícies dels elèctrodes s'origina una zona en que l'electròlit es posa en contacte amb la superfície metàl·lica conductora de l'elèctrode. Aquesta interfície forma un límit comú entre dues fases diferents. En aquest cas, la superfície d'elèctrode sòlid insoluble i l'electròlit líquid adjacent. En aquesta interfície es produeix el fenomen d'efecte de doble capa.

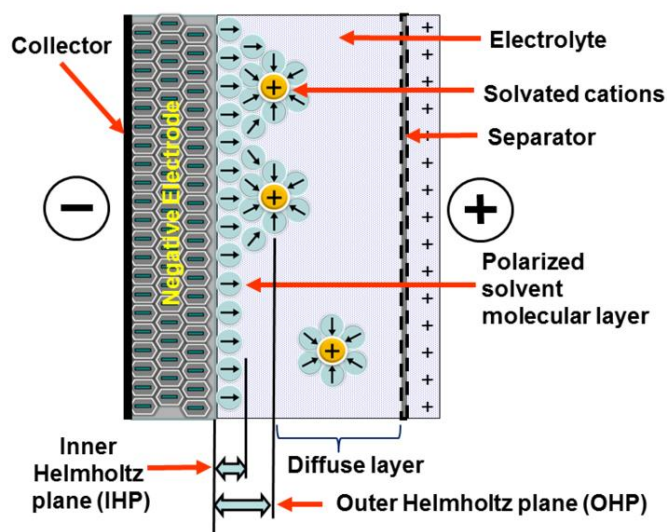


Fig. 2. Representació de la doble capa elèctrica. Font: Elcap Creative Commons.

L'aplicació d'una tensió a un condensador electroquímic fa que als dos elèctrodes del condensador es generin les dobles capes elèctriques. Els ions carregats de l'electròlit es desplacen fins les superfícies dels elèctrodes de signes oposats, generant dues capes: una primera formada per l'entramat superficial de l'elèctrode i una segona (amb càrrega oposada) que s'origina a partir dels ions solvatats i desolvatats en l'electròlit.

Entre les dues capes es troba un conjunt de molècules de dissolvent, les quals estan adherides físicament a la superfície de l'elèctrode mitjançant adsorció i formen el pla intern de Helmholtz (PIH) que actua com un dielèctric a mida molecular. En el procés no hi ha transferència de càrrega entre l'elèctrode i l'electròlit. No es generen enllaços químics sinó que és un procés produït per forces electrostàtiques.

La quantitat de càrrega a l'elèctrode coincideix amb la magnitud de les contra-càrregues en el pla extern de Helmholtz (PEH). Tal i com s'ha incidit en el paràgraf anterior, l'emmagatzematge de la doble capa intersticial té naturalesa electrostàtica.

La doble capa té un comportament similar al de la capa dielèctrica existent en un condensador convencional, però amb l'espessor d'una sola molècula. Per tant, per a calcular la capacítància es pot usar la mateixa fórmula que s'usa per als condensadors estàndard. Aquesta es troba en la pàgina següent: [8]

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

D'acord amb aquesta fórmula, la capacítància (C) és màxima en condensadors fets de materials amb una alta permitivitat (ε), grans àrees de superfície de placa d'elèctrode (A) i una distància petita entre plaques (d). Degut a això, els supercondensadors tenen valors de capacítància molt més elevats que els condensadors convencionals, ja que la distància que trobem es de l'ordre de nanòmetres (de 0,1 a 10 nm), de l'ordre de la longitud de Debye. [9]

2.3.2. Pseudocapacitat:

La pseudocapacitat és una forma d'emmagatzematge d'energia elèctrica faràdica basada en la transferència de càrrega entre l'electròlit i l'elèctrode. Aquest fenomen succeeix a través de diferents processos com ara l'electroadsorció, la intercalació de molècules o una combinació d'aquests.

La pseudocapacitat s'acompanya d'una transferència de càrrega d'electrons d'un ió desolvatat i adsorbit. Típicament, només un electró per ió està involucrat. L'ió adsorbit no presenta cap reacció química amb els àtoms de l'elèctrode (no apareixen enllaços químics) ja que solament es produeix una transferència de càrrega.

La pseudocapacitat faràdica únicament té lloc amb la capacítància estàtica de doble capa. La quantitat d'aquesta depèn de l'àrea de la superfície, el material i la estructura dels elèctrodes. La quantitat de càrrega elèctrica emmagatzemada a causa de la pseudocapacitat és linealment proporcional al voltatge aplicat.

Les reaccions redox als supercondensadors són una seqüència molt ràpida de processos reversibles amb transferència d'electrons sense cap canvi de fase a les molècules de l'elèctrode. No implica crear o trencar enllaços químics.

Els àtoms o ions desolvatats que contribueixen a la pseudocapacitat simplement s'adhereixen a l'estructura atòmica de l'elèctrode i les càrregues es distribueixen a les superfícies de les plaques mitjançant processos d'adsorció física. En comparació amb les bateries, els processos faradostàtics dels supercondensadors són molt més ràpids i estables amb el temps. [10] [11]

2.4. Classificació dels supercondensadors:

Com s'ha descrit anteriorment, l'emmagatzematge d'energia elèctrica en els supercondensadors s'obté a través de dos mecanismes: la doble capa elèctrica i la pseudocapacitat electroquímica. La distribució dels dos tipus de capacitància depèn del material i l'estructura dels elèctrodes. Així, els supercondensadors es divideixen en tres grans grups:

- Condensadors electroquímics de doble capa elèctrica: en aquest grup l'elèctrode es construeix generalment amb materials amb base de carboni, en el que l'efecte de la doble capa té major pes que la pseudocapacitat.
- Pseudocondensadors: aquest grup està construït amb polímers conductors o òxids de metalls. La pseudocapacitat té major pes en aquest grup.
- Condensadors híbrids: en aquest grup l'elèctrode es forma amb materials compostos combinats constituïts per les tres classes de materials anomenats anteriorment (materials amb base de carboni, polímers conductors i òxids de metall). En aquest grup trobem tant processos faràdics com no-faràdics per l'emmagatzematge de càrrega.

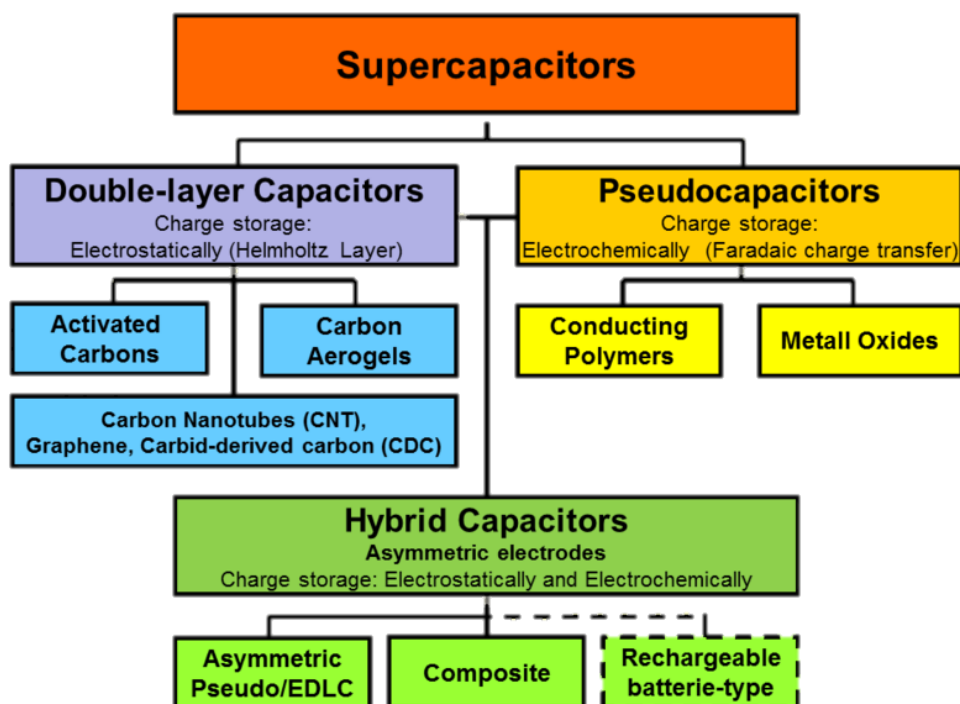


Fig. 3. Classificació dels supercondensadors.

Font: imatge de domini públic.

2.5. Materials usats per als supercondensadors

Les propietats dels supercondensadors venen determinats per la interacció entre els materials pels quals estan constituïts, especialment per la combinació de l'elèctrode i el tipus d'electròlit, que determina la funcionalitat i les característiques tèrmiques i elèctriques del mateix.

A continuació es veurà per quins materials es componen les parts més característiques dels supercondensadors: l'elèctrode i l'electròlit, que al mateix temps divideixen els supercondensadors en els diferents tipus que s'han mencionat anteriorment.

2.5.1. Elèctrodes

Els elèctrodes són en general recobriments prims aplicats i connectats elèctricament a un col·lector de corrent conductor i metàl·lic. Els elèctrodes han de tenir una bona conductivitat, estabilitat a alta temperatura, estabilitat química a llarg termini, alta resistència a la corrosió, han de ser inerts i han de tenir altes superfícies per volum i massa unitaris. El cost és un aspecte important per a la seva fabricació, però també han de ser mediambientalment sostenibles.

Els elèctrodes solen ser de material porós amb una superfície específica molt elevada. En general, com més petit és el porus de l'elèctrode major és la capacitat i l'energia específica. Per contra, reduir la mida del porus augmenta la resistència equivalent sèrie i disminueix la potència específica. Per a altes potències es necessiten porus més grans, mentre que per altes energies es necessiten porus més petits.

2.5.1.1. Elèctrodes per a condensadors electroquímics de doble capa elèctrica

El material per a aquests elèctrodes més comunament usat és el carbó en totes les seves variants: el carbó actiu, les fibres de carboni, els aerogels, els nanotubs de carboni (CNT), el grafè i els carbonis derivats de carburs (CDC). [12]

Els elèctrodes basats en carboni presenten bàsicament capacitat de doble capa, tot i que també pot haver-hi una petita quantitat de pseudocapacitat en funció de la distribució de la mida del porus. Les mides dels porus en els carbonis solen anar des dels microporus (menys de 2 nm) fins als mesoporus (2-50 nm), i solament els primers contribueixen en la pseudocapacitat. [13]

2.5.1.1.1 Carbó actiu

El carbó actiu és una forma molt porosa de carboni que té una superfície específica molt elevada. Aproximadament 1 gram d'aquest material té una àrea d'entre 1000 i 3000 m².

El carboni amorf consolidat (CAC) és el material d'elèctrode més utilitzat per supercondensadors, és més barat que altres derivats del carboni i pot arribar a tenir una capacítància específica de fins a 200 F/g. [14]

El desavantatge més gran que presenten aquests elèctrodes és que tenen una baixa conductivitat.

2.5.1.1.2 Fibres de carboni

Aquestes fibres es produeixen a partir de carbó actiu. Poden tenir microporus amb una distribució de mides molt petites que es poden controlar fàcilment. La seva superfície específica és d'uns 2500 m²/g i poden arribar a tenir capacitàncies específiques de fins a 175F/g. [15]

Tenen l'avantatge de tenir baixa resistència elèctrica i de presentar un bon contacte amb els col·lectors.

2.5.1.1.3 Aerogels

L'aerogel de carboni és un material extremadament porós, sintètic i ultralleuger derivat d'un gel orgànic en el qual els components líquids s'han substituït per un gas. Presenten una conductivitat més elevada que els materials de carbó actiu.

Amb aquest material es poden assolir gruixos d'elèctrode extremadament fins, amb un espessor de centenars de micròmetres i amb una mida de porus uniforme. La seva superfície específica és d'entre 400 i 1200 m²/g i la seva capacítància volumètrica arriba fins valors de 104 F/cm³. [16]

Tenen l'avantatge de tenir bona estabilitat mecànica i contra vibracions, per la qual cosa són perfectes per a supercondensadors utilitzats en medis on hi ha altes vibracions.

2.5.1.1.4 Nanotubs de carboni (CNTs)

Els nanotubs de carboni són molècules de carboni que tenen una nanoestructura cilíndrica, de la qual es pot variar la seva conformació i controlar el seu ordre cristal·lí amb la manipulació de diversos paràmetres. Tenen una baixa resistivitat i presenten superfícies específiques de fins a $1300 \text{ m}^2/\text{g}$ i capacitats específiques de fins a 180 F/g . [17]

2.5.1.1.5 Grafè

El grafè és un material de l'espessor d'un àtom de grafit, que té els seus àtoms disposats en una malla de patró hexagonal regular. També s'anomena "paper nanocompost".

Aquest material presenta l'avantatge de tenir una major conductivitat elèctrica que el carbó actiu i una elevadíssima capacitat i superfície específiques. Té una superfície específica de fins a $3100 \text{ m}^2/\text{g}$ i capacitats teòriques de fins a 550 F/g , però les aglomeracions limiten la seva capacitat específica a valors entre 100 i 200 F/g . [18] Hi ha diversos estudis en que s'han incorporat nanotubs de carboni com a separadors entre les làmines de grafè, i on s'han aconseguit capacitàncies de fins a 318 F/g . [19]

2.5.1.1.6 Carbonis derivats de carburs (CDCs)

Aquests materials són una família de carbonis derivats de precursors de carburs, com ara el carbur de silici binari i el carbur de titani, que es transformen en carboni pur mitjançant processos físics (descomposició tèrmica) o químics (halogenització).

Té l'avantatge que els diàmetres de porus es poden controlar amb relativa facilitat. Tot i això presenten capacitats específiques petites en relació als materials vists anteriorment, de fins a 135 F/g . [20]

2.5.1.2. Elèctrodes per a pseudocondensadors

En aquests supercondensadors, el tipus de material que forma l'elèctrode permet que la pseudocapacitat tingui un pes major en l'emmagatzematge energètic. Els supercondensadors formats per aquests elèctrodes tenen una densitat energètica més elevada que els de doble capa, però en contra, tenen una menor potència específica (degut a la mala conductivitat elèctrica que

presenten) i una menor esperança de vida (degut als múltiples cicles de reaccions redox que experimenten, les quals poden arribar a danyar el material). [21]

Els materials més usats per a produir aquests elèctrodes són els formats per òxids de metalls de transició i polímers conductors. [22]

2.5.1.2.1 Òxids metàl·lics

Aquests materials presenten baixes conductivitats elèctriques però donen altes capacitats. Els més comuns són els òxids de metalls de transició com ara el Ruteni (RuO_2), el Iridi (IrO_2), el Ferro (Fe_3O_4) o el Manganès (MnO_2), d'entre altres. [23]

Amb el Ruteni s'han arribat a tenir valors de capacitàncies de fins a 720F/g i amb el Manganès de fins a 1300F/g. [24] [25]

2.5.1.2.2 Polímers conductors

Aquesta família de materials destaca per la seva alta conductivitat i la baixa resistència sèrie equivalent (ESR), a més de tenir un rang de tensió admissible elevat i una activitat redox fàcilment ajustable mitjançant modificacions químiques. Tenen el desavantatge de tenir una estabilitat limitada al nombre de cicles. [26]

Aquest polímers inclouen la polianilina, el politiofè, el polipirrol i el poliacetilè. Poden arribar a tenir capacitàncies de fins a 120F/g. [27]

2.5.1.3. Elèctrodes per a supercondensadors híbrids

Els supercondensadors híbrids aprofiten les avantatges dels supercondensadors de doble capa i els pseudocondensadors amb l'objectiu d'aconseguir millors prestacions. Segons els materials usats per a fabricar-los, aquests es classifiquen en compostos, asimètrics i híbrids tipus bateria.

2.5.1.3.1 Híbrids compostos

Aquests tipus de materials es construeixen a partir de materials basats en carboni amb materials actius pseudocapacitatius incorporats o dipositats, com ara òxids metàl·lics i polímers conductors.

Diverses combinacions de materials han sigut experimentats. La combinació de RuO₂ amb aerogel de carboni ha donat capacitats de 256F/g i amb carbó negre s'han arribat a capacitats de 647F/g. Per a altres compostos de carboni s'han arribat a capacitats de fins a 900F/g. [28] [29] [30]

La combinació de polímers amb compostos de carboni ha donat valors de capacitat de fins a 1030F/g. [31]

2.5.1.3.2 Híbrids asimètrics

En supercondensadors, on els elèctrodes són híbrids asimètrics, un elèctrode està format per un material derivat del carboni i l'altre per un material de tipus pseudocapacitatiu.

Diverses combinacions de materials han sigut experimentats, donant capacitats elevades similars a la dels híbrids compostos. [32]

2.5.1.4. Supercondensadors tipus bateria

Aquests són molt similars als híbrids asimètrics amb la diferència de que presenten processos d'inserció i extracció de cations en un dels seus elèctrodes. L'altre elèctrode està format per materials derivats del carboni. Aquest tipus de supercondensadors estan en fase d'experimentació i es creu que amb aquesta configuració s'arribarà a tenir elevades potències específiques, capacitàncies elevades i grans esperances de vida. [33]

2.5.2. Electròlits

Aquests components consisteixen d'un producte químic dissolvent i un altre dissolt que es dissocia en cations i anions, fent que l'electròlit sigui elèctricament conductor. Com més ions conté, millor és la seva conductivitat.

En els supercondensadors, l'electròlit actua com la connexió elèctrica entre els dos elèctrodes, a més de proporcionar les molècules de la capa separadora a la doble capa elèctrica i lliurar els ions per permetre la pseudocapacitat. Aquest determina les característiques del condensador: la tensió d'operació, el rang de temperatura de treball, l'ESR i la capacitat. Per exemple, amb el mateix elèctrode de carbó actiu, un supercondensador amb electròlit aquós té un valor de capacitat de 160F/g, mentre que amb un electròlit orgànic té un valor de solament 100F/g. [34]

L'electròlit ha de ser químicament inert per garantir un comportament estable a llarg termini. Es poden trobar bàsicament electròlits aquosos i orgànics, tal i com es veu a continuació.

2.5.2.1. Electròlit aquós

L'aigua és un solvent relativament bo per als productes químics inorgànics. Tractada amb àcids com l'àcid sulfúric (H_2SO_4), bases com ara l'hidròxid de potassi (KOH), o sals com ara els compostos de fosfoni quaternari, el perclorat sòdic ($NaClO_4$), el perclorat de liti ($LiClO_4$) o hexafluoroarsenat de liti ($LiAsF_6$), l'aigua aconsegueix valors bastant alts de conductivitat d'entre 100 i 1000 mS/cm.

La tensió de dissociació dels electròlits aquosos és de 1,15 V per elèctrode (2,3 V de tensió total del supercondensador) i té un rang de temperatures de funcionament baix. S'utilitza aquest electròlit sobretot en supercondensadors amb baixa densitat d'energia i alta densitat de potència. [35] [36]

2.5.2.2. Electròlit orgànic

Els electròlits amb dissolvents orgànics com ara l'acetonitril, el carbonat de propilè, el carbonat de dimetil, i solucions com ara sals d'amoni quaternàries, tot i ser més cars, tenen una tensió de dissociació més elevada, d'uns 1,35 V per elèctrode (2,7 V de tensió total del supercondensador) i un rang de temperatures de funcionament més elevat.

Tanmateix, la conductivitat d'aquests electròlits és més petita (de 10 a 60 mS/cm). S'utilitzen aquests electròlits sobretot en supercondensadors amb alta densitat d'energia i baixa densitat de potència. [37]

2.5.3. Separadors

Aquests elements han de separar físicament els dos elèctrodes per evitar un curtcircuit causat per contacte directe. Solen ser molt prims i molt permeables als ions conductors per tal de minimitzar l'ESR. A més a més, han de ser químicament inerts per assegurar l'estabilitat del supercondensador i no influir negativament en la conductivitat de l'electròlit.

2.5.4. Col·lectors i Carcassa

Els col·lectors connecten els elèctrodes als terminals del supercondensador. Si la carcassa està feta de metall, els col·lectors han de fer-se del mateix material per evitar la formació de cel·les amb corrosió galvànica. [38]

2.6. Característiques dels supercondensadors:

A continuació es descriuran amb més detall les característiques més importants que defineixen a un supercondensador, que són les següents: la capacitat, la tensió de funcionament, la resistència interna, la càrrega i descàrrega, la capacitat energètica i potencial, el temps de vida útil, el temps d'autodescàrrega, la polaritat i la connectivitat entre condensadors en sèrie, paral·lel i mixta.

2.6.1. Capacitat:

La capacitat elèctrica, també coneguda com capacitància, és la propietat que presenten els cossos per mantenir una càrrega elèctrica. Els condensadors són els dispositius més comuns que poden emmagatzemar energia d'aquesta forma. La relació entre la diferència de potencial que existeix entre les plaques del condensador i la càrrega elèctrica emmagatzemada es descriu segons l'expressió següent:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

On:

- C és la capacitat mesurada en Farads. Aquesta unitat és relativament gran i sobretot en condensadors petits s'usen submúltiples com ara milifarads o microfarads. En supercondensadors, s'usa la unitat fonamental donat que presenten grans capacitàncies.
- Q és la càrrega elèctrica emmagatzemada, mesurada en Coulombs.
- V és la diferència de potencial, mesurada en Volts.

Cal destacar que la capacitat generalment és una quantitat positiva i que depèn de la geometria del condensador considerat i del dielèctric que s'introdueix entre les dues superfícies del condensador.

2.6.2. Tensió de funcionament

Els supercondensadors són components de baixa tensió. Per poder operar amb ells s'ha de fer sempre dins d'uns límits específics de tensió màxima. Aquest valor està marcat per la ruptura de l'electròlit, que és la tensió a partir de la qual es produeix la descomposició dels seus components.

Els supercondensadors amb electròlit aquós tenen un valor de tensió màxima entre 2,1 i 2,3V mentre que els supercondensadors amb dissolvent orgànic tenen un valor de 2,5 a 2,7V.

L'operació dels supercondensadors per sota de la seva tensió màxima millora l'esperança de vida d'aquests dispositius i l'estabilitat del seu comportament durant tota la vida útil.

Els supercondensadors poden treballar en tot el seu rang de tensió, ja que no presenten degradació per molt que se'ls descarregui. En canvi, la tensió a la que treballen experimenta canvis molt grans, ja que la càrrega emmagatzemada és proporcional a la tensió aplicada.

2.6.3. Corbes de càrrega i descàrrega

Les figures 4 i 5 mostren les característiques de les corbes de càrrega i descàrrega d'un supercondensador.

Durant la càrrega, la tensió augmenta de forma lineal i la intensitat es manté constant. Quan el supercondensador arriba al seu màxim, la intensitat cau dràsticament fins 0.

A la descàrrega a potència constant, la tensió cau i la intensitat puja de forma que la multiplicació d'un valor per l'altre sempre dona la potència constant.

En els supercondensadors no s'aprecien fenòmens de sobrecàrrega; la intensitat deixa de ser subministrada un cop el condensador arriba a la seva tensió màxima.

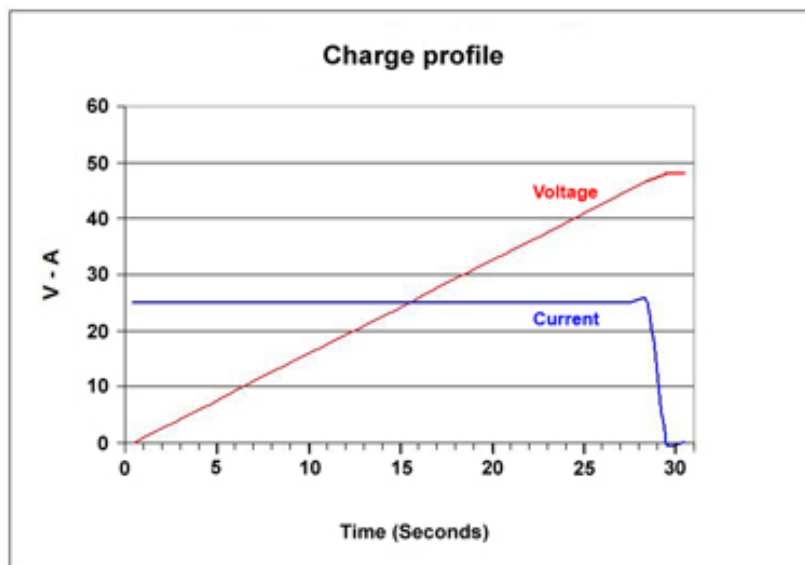


Fig. 4. Perfil de càrrega d'un supercondensador. Font: PPM Power.

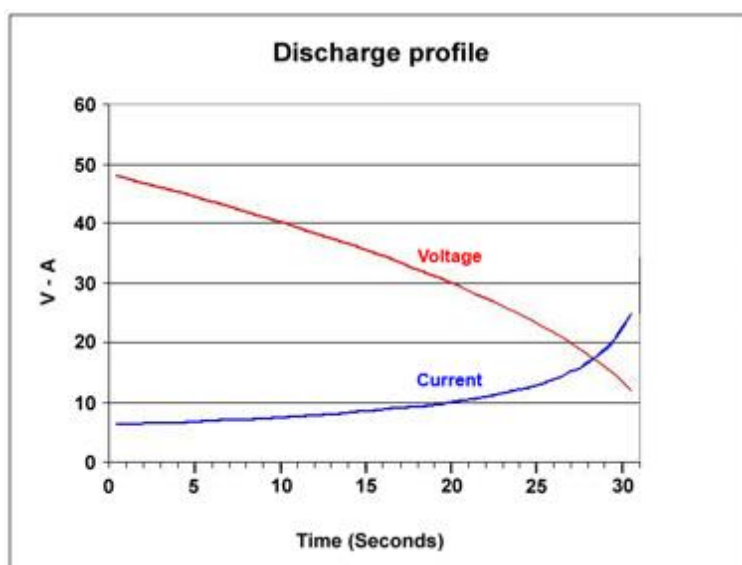


Fig. 5. Perfil de descàrrega d'un supercondensador. Font: PPM Power.

2.6.4. Estat de càrrega (SOC) i Profunditat de descàrrega (DOD)

L'estat de càrrega especifica la quantitat de capacitat disponible en el dispositiu, respecte a la seva capacitat nominal. S'expressa en tant per cent.

Ve determinada per la fórmula següent:

$$SoC = \frac{V_i^2}{V_{cond}^2} (100\%) \quad (3)$$

La profunditat de descàrrega representa la quantitat d'energia que es pot extreure del supercondensador. També s'expressa en tant per cent.

Ve determinada per la fórmula següent:

$$DoD = 1 - \frac{V_i^2}{V_{cond}^2} (100\%) \quad (4)$$

2.6.5. La resistència interna

La càrrega i la descàrrega d'un supercondensador està relacionat amb el moviment dels portadors de càrrega en l'electròlit a través del separador fins els elèctrodes i dins de la seva estructura porosa. Les pèrdues ocorren durant aquest moviment, que es pot mesurar com la resistència interna en corrent continu.

La resistència interna depèn del temps i augmenta amb la càrrega i descàrrega del supercondensador.

Aquesta resistència no s'ha de confondre amb l'ESR, que és la resistència interna en AC mesurada a 1kHz. L'ESR és molt més petita que la resistència interna dels supercondensadors i no és rellevant per al càlcul de corrents de fuga o corrents de pic.

Alguns dels paràmetres que afecten la resistència són:

- El nombre de cicles: la resistència augmenta amb els cicles de treball.
- La temperatura: de la mateixa forma, la resistència interna augmenta amb la temperatura degut a que s'accelera la degradació del supercondensador.
- La freqüència.

2.6.6. Capacitat energètica i potencial

Els supercondensadors ocupen el buit existent que hi ha entre els condensadors electrolítics d'alta potència i baixa energia i les bateries recarregables de baixa potència i alta energia, tal i com podem veure en el gràfic següent, anomenat "*Diagrama de Ragone*".

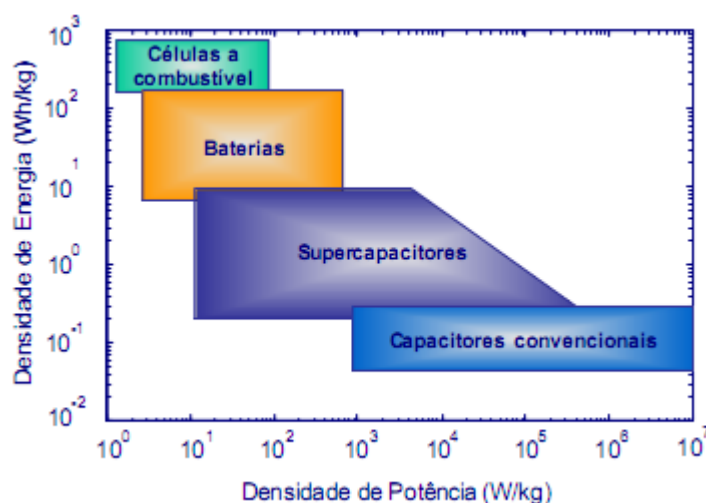


Fig. 6. Diagrama de Ragone. Font: ECyT de la Universitat de Madrid. [39]

L'energia màxima que es pot emmagatzemar en un supercondensador segueix la següent fórmula:

$$W_{max} = \frac{1}{2} C_{total} V_{nom}^2 \quad (5)$$

On:

- W_{max} : és l'energia màxima que es pot emmagatzemar.
- C_{total} : és la capacítància total del supercondensador.
- V_{nom} : és la tensió màxima a la qual pot operar.

En aquesta fórmula es fa una simplificació de la realitat ja que s'assumeix un comportament ideal del supercondensador.

La quantitat d'energia que es pot emmagatzemar en un supercondensador per unitat de massa s'anomena energia específica i s'acostuma a expressar en Wh/kg. Si es fa per unitat de volum, se l'anomena densitat energètica i s'expressa en Wh/l.

L'energia específica en la que es mouen supercondensadors comercials varia entre 0,5 i 15 Wh/kg, mentre que per una banda tenim els condensadors electrolítics que com a molt poden emmagatzemar 0,3Wh/kg, per l'altra banda tenim les bateries que poden arribar a emmagatzemar fins a 260Wh/kg.

Tot i que l'energia específica dels supercondensadors no és suficientment elevada per fer competència a les bateries, aquests presenten l'avantatge de tenir una elevada potència específica.

La densitat de potència descriu la velocitat a la qual l'energia pot ser subministrada. La potència mitjana del supercondensador es pot calcular tenint en compte la descàrrega d'energia amb la fórmula següent:

$$P = \frac{W_{eff}}{t_d} \quad (6)$$

On:

- P: és la potència del supercondensador.
- W_{eff} : és l'energia màxima emmagatzemada pel supercondensador.
- t_d : és el temps de descàrrega del supercondensador.

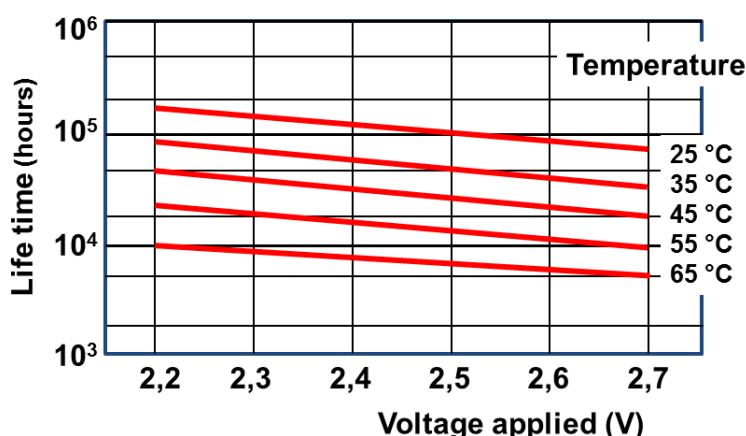
Les densitats de potència dels supercondensadors poden arribar a tenir valors de fins a 15 kW/kg. [39]

2.6.7. Esperança de vida

Com que els supercondensadors no depenen de canvis químics en els elèctrodes (exceptuant el cas dels elèctrodes de polímers), els temps de vida depenen principalment de la velocitat d'evaporació de l'electròlit líquid.

Aquesta evaporació en general és funció de la temperatura, del corrent de càrrega, de la freqüència de cicles de càrrega i de la tensió. El corrent de càrrega i la freqüència dels cicles generen calor intern, de forma que la temperatura de determinació de l'evaporació és la suma del calor ambiental i l'intern.

Aquesta temperatura es pot mesurar com la temperatura al centre del cos del condensador. Com més gran és la temperatura del nucli, més ràpida és l'evaporació i més curta és la seva vida útil.



*Fig. 7. Dependència de l'esperança de vida amb la temperatura i la tensió aplicada.
Imatge de domini públic.*

L'evaporació generalment dona com a resultat la disminució de la capacitat i l'augment de la resistència interna. Segons la norma IEC/EN 62391-2, les reduccions de capacítància superiors al 30% o la resistència interna superior a quatre cops la del full d'especificacions del producte, es consideren “fallada per desgast”, cosa que implica que el component ha arribat al final de la seva vida útil. [9]

La vida útil dels supercondensadors és elevada i pot arribar a ser de 15 a 20 anys a temperatura ambient. Els fabricants especifiquen la vida útil esperada del supercondensador en les condicions de temperatura i voltatge màxims. Aquesta especificació es realitza a partir d'una prova d'envelliment accelerat. Els resultats s'especifiquen en “datasheets” usant la notació “tested time (hours)/max. temperature (°C)” com per exemple 4000h/70°C. Amb aquest valor i les expressions derivades de dades històriques, els temps de vida es poden estimar per a condicions de temperatura més baixes.

A partir de les dades del “datasheet” i seguint la “regla dels 10 graus” es pot saber de forma aproximada el temps de vida real del supercondensador sota unes condicions determinades, diferents a les especificades. En aquesta regla s'usa l'equació d'Arrhenius:

$$L_x = L_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T_x}{10}} \quad (7)$$

On:

- L_x és l'esperança de vida.
- L_0 és l'esperança de vida especificada.
- T_0 és la temperatura especificada.
- T_x és la temperatura de treball.

Calculat amb aquesta fórmula, un supercondensador provat de 4000h a 70°C, tindria una esperança de vida estimada de 32000h a 40°C.

L'esperança de vida també depèn de la tensió de funcionament, ja que la formació de gas en l'electròlit líquid depèn de la tensió. Com menor sigui la tensió, menor serà la formació de gas i major la seva vida útil. No hi ha fórmula que relacioni el voltatge amb la vida útil d'un supercondensador. La figura 7 és un exemple de com fluctua la vida útil segons la temperatura i la tensió aplicats. Aquesta variació ha de ser especificada per cada fabricant i depèn de cada casa. [9]

2.6.8. Autodescàrrega

S'anomena Autodescàrrega a les corrents de fuga que es presenten en el supercondensador a causa de les irregularitats presents en els porus d'aquest. Com que l'emmagatzematge d'energia elèctrica a la doble capa es realitza amb distàncies de mida molecular, és molt fàcil que es puguin presentar irregularitats en els porus dels supercondensadors que donen lloc a petits intercanvis de portadors de càrrega i que porta a una descàrrega gradual.

L'autodescàrrega depèn de la capacitat, la tensió, la temperatura i l'estabilitat química del supercondensador.

Els fabricants l'especifiquen com a temps d'autodescàrrega, ja que aquesta corrent de fuga és molt petita i la millor forma d'especificar-la és usant rangs de temps elevats (de hores o dies). Com a exemple un supercondensador Panasonic 5,5V/F especifica una baixada de tensió a 20°C de 5,5V a 3V en 600 hores (25 dies). [40]

Degut a que l'autodescàrrega en els supercondensadors és tan petita, aquesta no s'ha considerat a l'hora de fer la simulació del supercondensador. Els experiments realitzats han sigut de minuts de duració i l'autodescàrrega és negligible per aquests rangs de temps.

2.6.9. Polaritat

En els supercondensadors simètrics els dos elèctrodes es constitueixen pel mateix material. Així, teòricament els supercondensadors no presenten polaritat vertadera i normalment no s'haurien de produir fallades catastròfiques. Tanmateix, invertir la càrrega d'un supercondensador disminueix la seva capacitat, per la qual cosa es recomanable mantenir la polaritat resultant de la formació dels elèctrodes durant la seva producció. En canvi, els supercondensadors asimètrics sí són intrínsecament polars. Una barra en el terminal catòdic identifica la part polaritzada del component.

2.6.10. Connectivitat dels supercondensadors en sèrie i en paral·lel

Donat que cada supercondensador és únic, existeix una lleugera diferència en els valors de capacítancia i ESR de dos supercondensadors en principi iguals. Cal equilibrar-los de forma activa o passiva per estabilitzar la tensió aplicada quan es connecten en sèrie o en paral·lel i evitar problemes de funcionament.

El balanç passiu és una tècnica que consisteix en utilitzar una resistència de bypass, del mateix valor que les resistències dels supercondensadors, en paral·lel amb cada cel·la. Això fa reduir els corrents de fuga ja que les cel·les amb major tensió descarreguen a través de la resistència en paral·lel molt més que les altres. Tanmateix el seu ús es limita a aplicacions on el supercondensador no pateix càrregues i descàrregues de forma regular.

Així, per aplicacions amb molts cicles és preferible fer ús del balanç actiu, el qual usa circuiteria electrònica que obliga a cada cel·la a estar a una tensió de referència fixada. Molts fabricants ja inclouen balanç actiu en els seus mòduls de condensadors. [41]

Per la connectivitat dels supercondensadors s'haurà de tenir en compte que la capacitat, l'ESR i la tensió total segueixen les següents fórmules:

$$C_{tot} = C \frac{C_{par}}{C_{ser}} \quad (8)$$

$$ESR_{tot} = ESR \frac{C_{ser}}{C_{par}} \quad (9)$$

$$V_{tot} = V \cdot C_{ser} \quad (10)$$

On:

- C_{tot} : capacitat equivalent de la configuració de supercondensadors determinada.
- C : capacitat de cada condensador per separat.
- ESR_{tot} : ESR equivalent de la configuració de supercondensadors determinada.
- ESR : ESR de cada condensador per separat.
- V_{tot} : tensió total de la configuració de supercondensadors determinada.
- V : tensió de cada condensador per separat.
- C_{ser} : cel·les en sèrie.
- C_{par} : cel·les en paral·lel.

3. Elements per a l'emulació del supercondensador

Un cop explicat què són els supercondensadors i les seves característiques més destacades es passarà a veure com s'ha realitzat el desenvolupament del simulador del supercondensador mitjançant l'ús d'una font programable de dos quadrants.

Es dividirà aquesta secció en dos subapartats, el "hardware" i el "software". En primer lloc s'explicaran aquells elements físics que s'han usat per a la realització del simulador del supercondensador, el qual s'ha desenvolupat en el laboratori E3PACS de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est de la UPC. En segon lloc s'explicarà el software, que és bàsicament la modelització del supercondensador i la programació duta a terme.

Finalment, veurem l'enllaç entre aquestes dues parts, que és essencial per que el simulador i el sistema físic funcionin correctament.

3.1. Elements físics

Els elements usats per a la realització del simulador de supercondensadors són: font de potència programable de CC, bidireccional i regenerativa (Regatron TC.GSS), càrrega electrònica programable de CA i CC "Adaptive Power", una font d'alimentació i un ordinador, a més de les proteccions i el cablejat necessaris per a fer les connexions, tant elèctriques com de comunicació.

3.1.1. Font de potència programable de CC, Regatron TC.GSS

Aquest element bidireccional pot funcionar com a font o com a càrrega de CC d'alta potència i tal com es veurà en més detall és molt útil per tal de fer proves de càrrega i descàrrega d'energia elèctrica. Les característiques més destacades de la Regatron són:

- Bidireccional i completament regenerativa.
- Rangs de tensió nominals de: 65, 130, 400, 500 i 600 V_{cc} i fins a 1500 V_{cc} en unitats connectades en sèrie. La font disponible al laboratori és de 500 V_{cc} .
- Rang de potència: existeixen versions de 20 kW i 32 kW. La font disponible al laboratori és de 20 kW.
- Pot treballar a tensió constant, corrent constant i potència constant.
- Concepte modular per poder augmentar la tensió i la potència fàcilment. Configuració en sèrie, paral·lel o matricial amb operació de mestre-esclau.

- Controlador completament digital.
- Control analògic extern.
- Alta eficiència a un baix cost, resultat de l'aplicació de tecnologia innovadora amb IGBTs.
- Aïllament galvànic i alta densitat de potència.
- Interfícies disponibles: RS-232 (estàndard), IEEE488.2, Ethernet, USB, CANopen, CANMP, RS-422.
- Drivers per a controlar-lo en LabVIEW, C/C++, .NET.
- Software d'operació i control "TopControl" que permet realitzar la programació del sistema i automatitzar procediments d'assajos.
- Software d'aplicacions: SASControl per a simulació de panells solars fotovoltaics i BATSim per a simulació de bateries.



Fig. 8. Font programable Regatron TC.GSS. Font: Regatron.

Les seves especificacions elèctriques més destacades són les següents:

- Es pot alimentar amb tensió de xarxa: 3 x 360 – 440 V_{ca} (I-I).
- Freqüència de xarxa d'entre 48 i 62 Hz.
- Corrent d'entrada de 3 x 32 A_{rms},
- Tipus de connexió de 3L + PE (sense neutre).
- Secció de cable recomanada superior a 10mm².

- Rang de tensió de treball entre 0 i 500 V_{cc}.
- Rang de corrent de treball entre 0 i ±50 A_{cc}.
- Rang de potència de treball entre 0 i ±20 kW.
- Secció de cable de sortida superior a 16 mm².
- Eficiència a potència nominal superior al 92%.
- Rang de resistència interna de 0 a 1000 mΩ.

Interiorment, la font està constituïda esquemàticament pels següents elements:

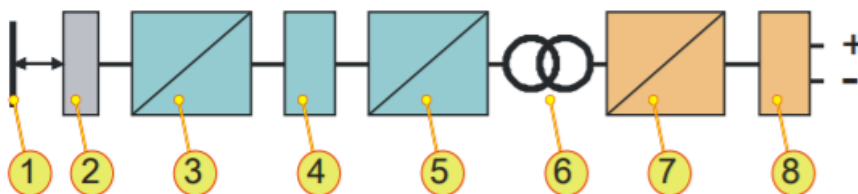


Fig. 9. Elements que constitueixen la font programable. Font: Regatron.

1. Connexió a la xarxa elèctrica
2. Filtre.
3. Rectificador + PFC (correcció del factor de potència)
4. Circuit intermedi de DC
5. Inversor
6. Transformador
7. Inversor
8. Filtre de sortida

Elements que constitueixen la interfície estàndard:

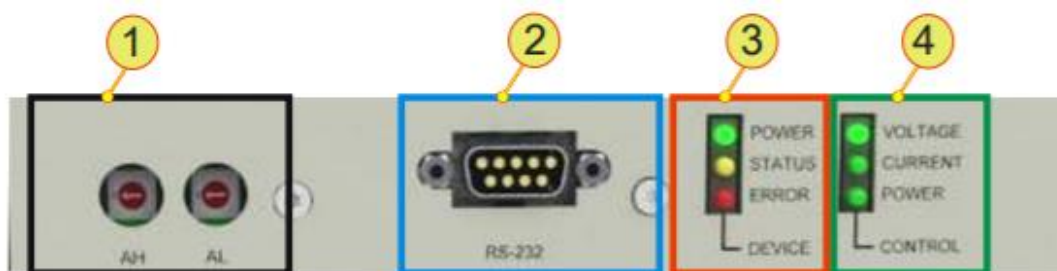


Fig. 10a. Alguns dels components de la interfície estàndard. Font: Regatron.

1. Interruptor de selecció de la direcció del dispositiu per a operació multiunitat. L'estàndard està cobert amb tapes de plàstic. AH: rang de direcció superior. AL: rang de direcció inferior.
2. Interfície RS-232 per a connexió amb PC.
3. Indicadors LED sobre l'estat del dispositiu:
 - Verd: el dispositiu està engegat i el funcionament és correcte.
 - Groc: avís d'alerta.
 - Vermell: error.
4. Indicadors LED de control. El LED s'il·lumina en l'estat que estigui en funcionament.
 - Tensió: control de tensió.
 - Corrent: control de corrent.



Fig. 10b. Alguns dels components de la interfície estàndard. Font: Regatron.

1. Display. Indicació dels paràmetres i estat de la font i menús variis. Indica bàsicament la tensió, la corrent i la potència de referència que s'hagi introduït, i la tensió, la corrent i la potència que el Regatron està subministrant.
2. Interruptor selector rotatiu, el qual s'usa per a la selecció dels elements del menú i la configuració dels paràmetres de la font.
3. Botó Display, el qual s'usa per tornar a l'última pantalla interactiva que s'utilitza.
4. Botó Esc, utilitzat per generar una seqüència de sortida (sortir/cancel·lar).
5. Botó Menú, utilitzat per obrir el menú.
6. Interruptor ON/OFF.
 - On: S'il·lumina el LED verd i indica que la font està engegada.
 - Off: El LED està apagat i la font està elèctricament aïllada.
7. Interruptor Remote. S'utilitza per poder controlar el dispositiu de forma remota.
 - Desactivat: el LED vermell està apagat i el dispositiu es manipula de forma manual i "in situ".
 - Activat: el LED vermell està engegat i el dispositiu es pot controlar de forma remota.
8. Botó Next, que s'usa en la selecció de paràmetres o en els menús.

Els valors dels paràmetres es poden indicar d'aquesta forma manual, amb un Software propi de l'empresa anomenat TopControl o amb un altre tipus de Software, com ara el LabVIEW, que és la forma en què s'ha usat en aquest treball.

En l'apartat del Software utilitzat s'explicarà amb més profunditat com es donen valors de consigna als paràmetres de la font.



Fig. 11. Regatron vist des del darrere. Font: Regatron

En la imatge superior es veu la font programable vista des del darrere. Es veu que hi ha una sèrie d'interfícies de connexió (X109, X105, X101, etc.), les quals no s'han utilitzat en aquest projecte. A la part inferior dreta està la connexió per a l'alimentació del Regatron (3P + terra) i a la part inferior esquerra es troben els borns de sortida, en els quals es connecta la UBP (unitat sota prova, que pot ser la càrrega o una font). També s'aprecien en el centre de la imatge un conjunt de ventiladors la funcionalitat dels quals és la dissipació tèrmica de la calor que es produeix durant l'ús del dispositiu.

3.1.1.1. Modes d'operació

Com ja s'ha explicat la font és bidireccional i pot funcionar en dos modes d'entre els quatre quadrants: mode Q1 i mode Q4.

3.1.1.1.1 Mode Q1

El sistema se comporta com una font de potència programable de CC. En aquesta configuració l'energia flueix des del sistema fins la UBP. Els valors de consigna són positius tant per la tensió com per la corrent, el que es manifesta en una potència positiva. Es pot veure aquest funcionament esquematitzat en la figura següent:

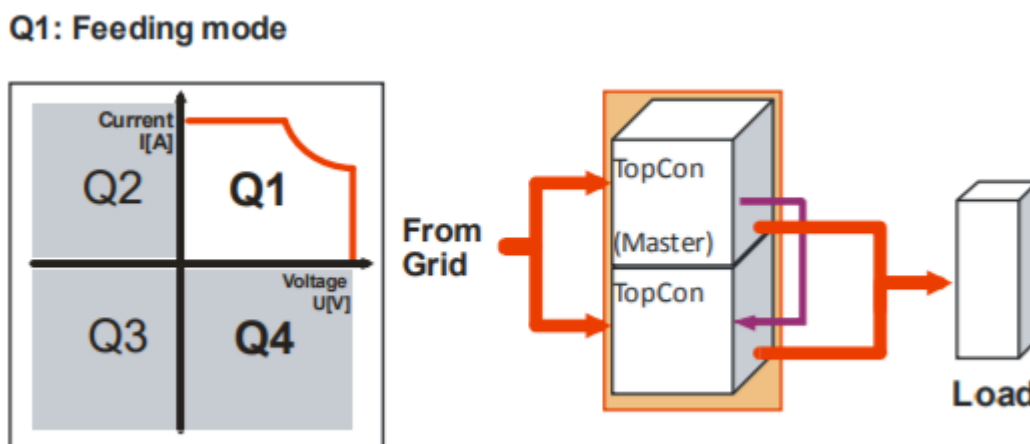


Fig. 11. Mode d'alimentació. Font: Regatron.

3.1.1.1.2 Mode Q4

En aquest cas el sistema es comporta com una càrrega electrònica programable de CC, regenerativa. L'energia flueix des de la UBP fins al sistema. El valor de consigna és positiu per a la tensió i negatiu per a la corrent, el que es resumeix en una potència negativa. Es pot veure aquest funcionament esquematitzat en la figura següent:

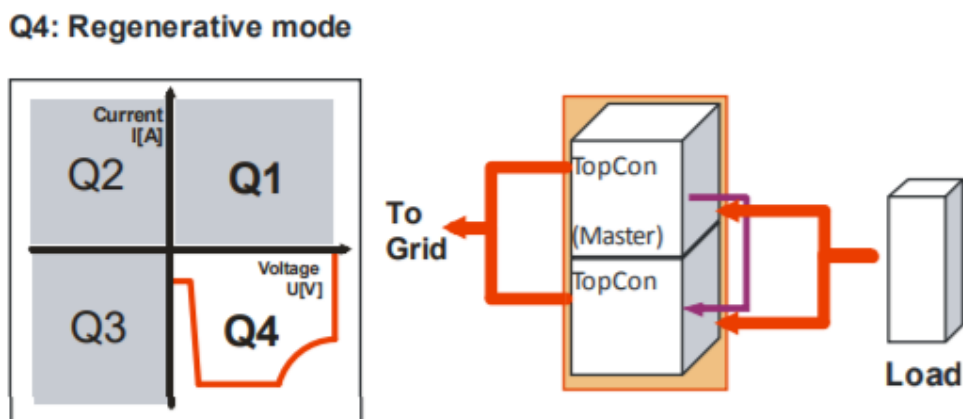


Fig. 12. Mode de regeneració. Font: Regatron.

A la figura de a continuació podem veure els punts límits de treball de la Regatron:

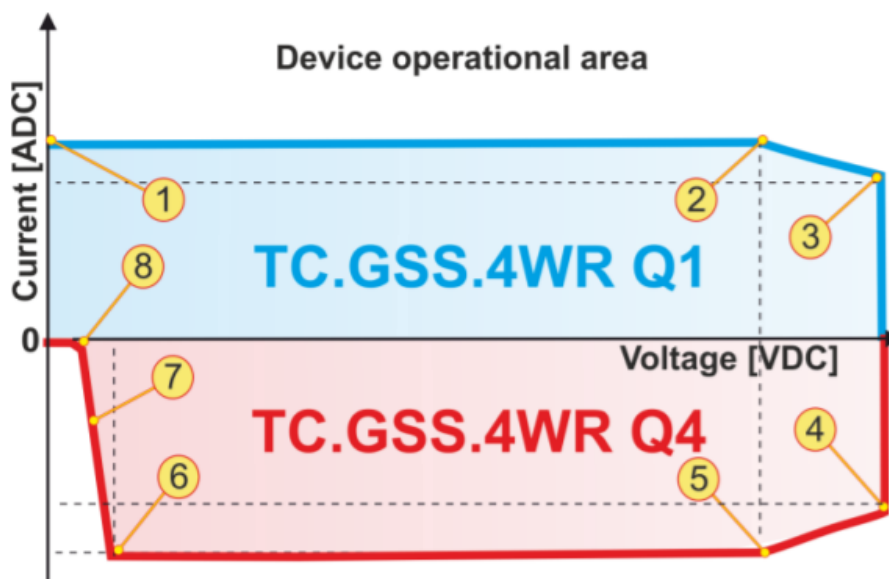


Fig. 13. Àrea d'operació del dispositiu. Font: Regatron.

En el primer quadrant tenim els límits següents:

- Punt 1: Tensió de 0 V i Corrent de 50 A.
- Punt 2: Tensió de 400 V i Corrent de 50 A.
- Punt 3: Tensió de 500 V i Corrent de 40 A.

En el segon quadrant tenim els límits següents:

- Punt 4: Tensió de 500 V i Corrent de -40 A.
- Punt 5: Tensió de 400 V i Corrent de -50 A.
- Punt 6: Tensió de 40 V i Corrent de -50 A.
- Punt 7: Tensió de 25 V i Corrent de -20 A.
- Punt 8: Tensió de 15 V i Corrent de 0 A.

És molt important considerar aquestes limitacions a l'hora de fer qualsevol tipus d'experiment amb aquest dispositiu. Així ha sigut a l'hora de fer els corresponents experiments en aquest projecte.

Aquest font presenta moltíssimes funcionalitats i es pot usar en un ampli ventall de possibilitats. Per a la realització del projecte, s'expliquen aquelles parts que s'han fet servir, sobretot de cara a com s'han realitzat les comunicacions entre aquest i el programa que el fa córrer, cosa que es veu en l'apartat de Software i Comunicacions.

3.1.2. Càrrega electrònica programable de CA i CC, Adaptive Power

Aquest dispositiu funciona com a càrrega però amb la particularitat de que és programable. Al igual que amb el Regatron se li poden assignar els valors dels paràmetres que corresponguin i pot ser tant una càrrega de CA com de CC, cosa que es tradueix en una gran flexibilitat. Les característiques més destacades d'aquest dispositiu són:

- Pot funcionar com a càrrega electrònica de CA i com a càrrega de CC.
- Presenta 3 modes d'operació: CC, LIN, CR.
- Permet la programació a través del panell frontal, o a través de les interfícies de comunicació RS232 o GPIB.
- Mesures de corrent i tensió d'alta resolució i exactitud.
- Rang de freqüències que va des de DC fins a 400 Hz.
- Control de factor de potència i del factor de cresta en modes CC i LIN.
- Incorpora proteccions de sobrecorrents, sobrepotència, sobre tensió (aquestes tres s'activen quan es supera el 105% del seu valor nominal), sobretemperatura (quan es superen els 85°C) i polaritat inversa.
- Mostreig de tensió local o remota.
- Entrada de sincronització externa.
- Sortida de monitorització de corrent.



Fig. 14. Càrrega programable 3B Series AC & DC. Font: Adaptive Power.

Les característiques elèctriques més destacades de la càrrega programable són les següents:

- La tensió d'entrada d'alimentació és de 230 V_{ac} amb una tolerància del 10%, monofàsica i de freqüència 50 Hz.
- Rang de tensió d'entrada de càrrega es troba entre 50 i 300 V_{rms} / V_{cc}
- Rang de corrent d'entrada de càrrega d'entre 0 i 108 A.
- Rang de potència d'entrada de càrrega d'entre 0 i 10800 W.
- Formes d'ona: sinusoidal, quadrada, DC.

La connexió de la càrrega es pot fer en el panell frontal mitjançant bananes de 4 mm, limitades a 20 A o en el panell posterior mitjançant entrades tipus barra que poden suportar fins a 108 A. La secció del cable ha de ser de 35 mm².

La càrrega presenta els tres modes d'operació següents:

- Corrent constant (CC): La càrrega electrònica demanarà un nivell constant de corrent d'acord amb el valor que s'hagi assignat per l'usuari, independentment de la variació de la tensió d'entrada.

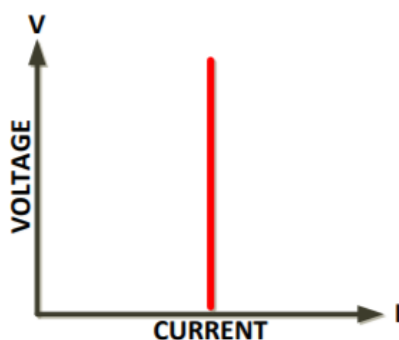


Fig. 15. Gràfica representativa del mode d'operació a corrent constant.

Font: Adaptive Power.

- Corrent constant lineal (LIN): la càrrega electrònica demanarà un corrent d'acord al nivell programat, independentment de la tensió d'entrada, responent a la forma d'ona de tensió en temps real. En aquest mode, la càrrega electrònica actuarà d'immediat davant un increment sobtat en la tensió d'entrada. Aquest mode és especialment adequat per entrades de tensió AC no sinusoidals com ara formes d'ona quadrades, per passos o qualssevol altra forma d'ona altament distorsionada.
- Resistència constant (CR): la càrrega electrònica demanarà un corrent directament proporcional a la tensió d'entrada d'acord amb el valor programat de la resistència seguint la Llei d'Ohm.

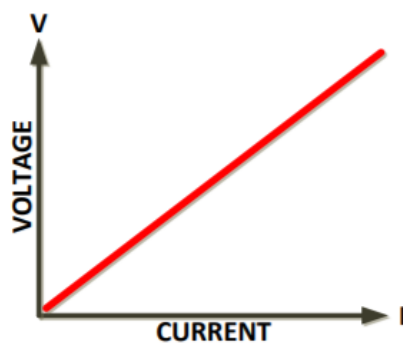


Fig. 16. Gràfica representativa del mode d'operació a resistència constant.

Font: Adaptive Power.

La càrrega es pot programar a través del panell frontal o a través d'un Software propi amb les interfícies de comunicació GPIB o RS232.

En la següent imatge es veu el panell frontal, on:

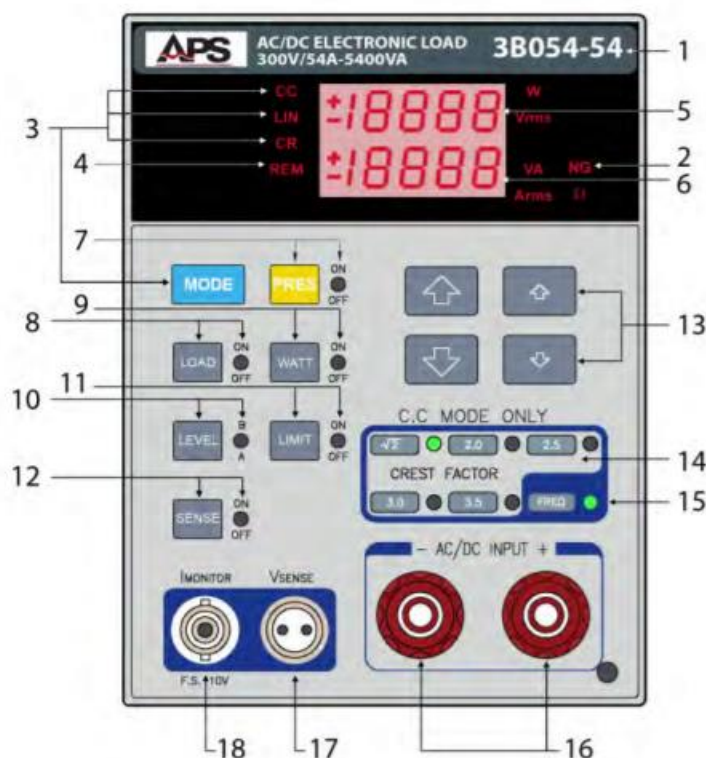


Fig. 17. Panell frontal de la càrrega programable. Font: Adaptive Power.

1. El número del model i el rang de treball.
2. Indicador Go/NoGo.
3. Indicadors del mode d'operació i la tecla per poder seleccionar el mode.
4. Indicador de l'operació remota. En cas d'operació remota, el panell de control frontal està bloquejat i solament el display mostra els valors que es determinin.
5. Display superior que en condicions estàndard mostra la tensió (V_{rms}) sensada pel dispositiu. També pot mostrar la potència o la freqüència en lloc de la tensió.
6. Display inferior que en condicions estàndard mostra el corrent (A_{rms}) sensada pel dispositiu sempre i quan el PRESET estigui desactivat. Si aquest està activat mostrarà els valors de consigna que es vulguin determinar (En els modes CC i LIN es mostrarà el seu valor en A_{rms} i en el mode CR es veurà el valor en Ω). També es pot mostrar la freqüència en aquest display.
7. Botó del PRESET i indicador del seu estat. Quan es prem aquest botó es pot configurar els valors de consigna segons el mode d'operació en que es trobi.
8. Botó LOAD i indicador del seu estat. Quan es prem aquest botó la càrrega es posa en funcionament o es desactiva. Quan està engegada comença a absorbir corrent i quan s'apaga es posa en un estat d'alta impedància que impedeix la seva absorció.
9. Botó WATT que serveix per mostrar la potència absorbida per la càrrega.
10. Botó LEVEL que serveix per posar 2 valors de consigna (A o B).
11. Botó LIMIT que s'usa per visualitzar els límits de mesura.
12. Botó SENSE que s'usa com a voltímetre.
13. Botons que s'usen per a pujar o baixar els valors de la consigna quan s'està configurant amb el PRESET.
14. Selecció del factor de cresta per a variar l'angle de fase entre la tensió i la corrent. Donat que al projecte s'ha fet servir la càrrega en DC no s'ha prestat més atenció a la configuració d'aquest paràmetre.
15. Mode FREQ per a l'ajust de la freqüència (Càrrega AC o DC) i el factor de potència.
16. Terminals d'entrada.
17. Connector per mesurar tensió externa.
18. Monitor de la corrent de sortida.

La càrrega també té incorporats terminals d'entrada per a cables de comunicació GPIB i RS232 tal i com es pot veure a la següent imatge:

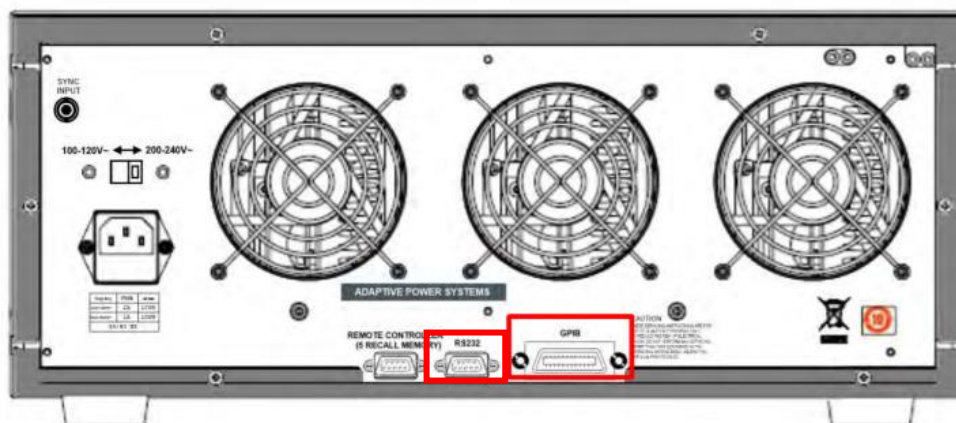


Fig. 18. Localització de les interfícies RS232 i GPIB a la càrrega programable.

Font: Adaptive Power.

A continuació es veuen els límits de funcionament de la càrrega programable:

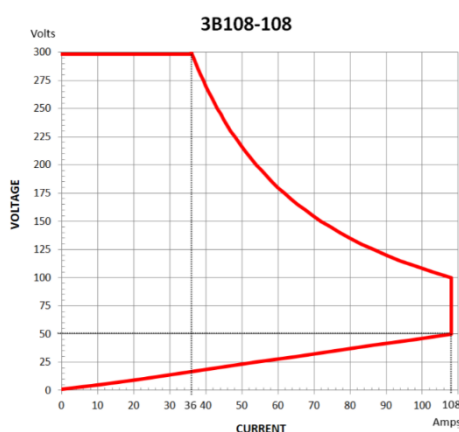


Fig. 19. Àrea d'operació del dispositiu. Font: Adaptive Power.

Aquestes limitacions són molt importants a l'hora de fer qualsevol tipus d'experiment amb aquest dispositiu, les quals s'han considerat a l'hora de fer-ne els corresponents en aquest projecte.

Tal i com es veu, aquesta càrrega programable presenta moltíssimes funcionalitats i es pot usar en un llarg ventall de possibilitats. En aquest projecte s'ha fet servir aquesta càrrega en mode CR i com a càrrega DC. En l'apartat de les simulacions s'explicarà amb més detall els passos que s'han dut a terme i com s'han dut a terme per fer servir aquesta càrrega.

3.1.3. Font d'alimentació

Per tal de poder utilitzar la font programable com a càrrega, s'ha fet servir una font d'alimentació típica on es pot regular la tensió i la corrent que pot entregar. Aquest tipus de fonts d'alimentació donen poca corrent comparant-ho amb les corrents que poden aguantar els supercondensadors, que pot arribar a ser de milers d'amperes tal i com es pot veure a l'exemple de datasheet del condensador en els annexos. Però aquesta ha sigut la única forma de poder usar la font programable com a càrrega a l'hora de fer l'experiment de verificació de la corba de càrrega d'un supercondensador (cosa que es veurà més endavant, en l'apartat dedicat a les simulacions realitzades).

Aquest fet simplement implica que el supercondensador triga més temps a carregar-se completament i amb les simulacions el que es vol veure és si el programa realitzat funciona correctament i les corbes de càrrega i descàrrega tenen el comportament esperat.

3.2. Software

A continuació es presentaran els diferents programes que s'han fet servir per a la realització del projecte. Tenim en primer lloc el programa TopControl de Regatron per al control de la font programable, en segon lloc el programa APS AC/DC Load Gui per al control de la càrrega programable, i finalment el programa LabVIEW, el qual s'ha usat per al control de la font programable Regatron i per a la simulació del supercondensador. També s'explicarà com s'ha modelitzat el supercondensador i com s'ha adaptat al llenguatge de LabVIEW.

3.2.1. TopControl

Aquest programa permet controlar la font programable des d'un PC, el qual presenta les següents funcionalitats:

- Arrencada i parada.
- Control de la tensió, la intensitat, la potència i la resistència interna.
- Gestió d'errors
- Ajust de proteccions.
- Entrades de control
- Monitorització de valors i gràfiques de tendències.
- Programació de VLS (límits de V, I, P actuant sobre relés de sortida).

Amb aquest programa es pot fer el mateix que amb el panell frontal del Regatron però amb la comoditat afegida de fer-ho des d'un ordinador portàtil de forma remota. A la figura següent es veu l'aspecte del programa.

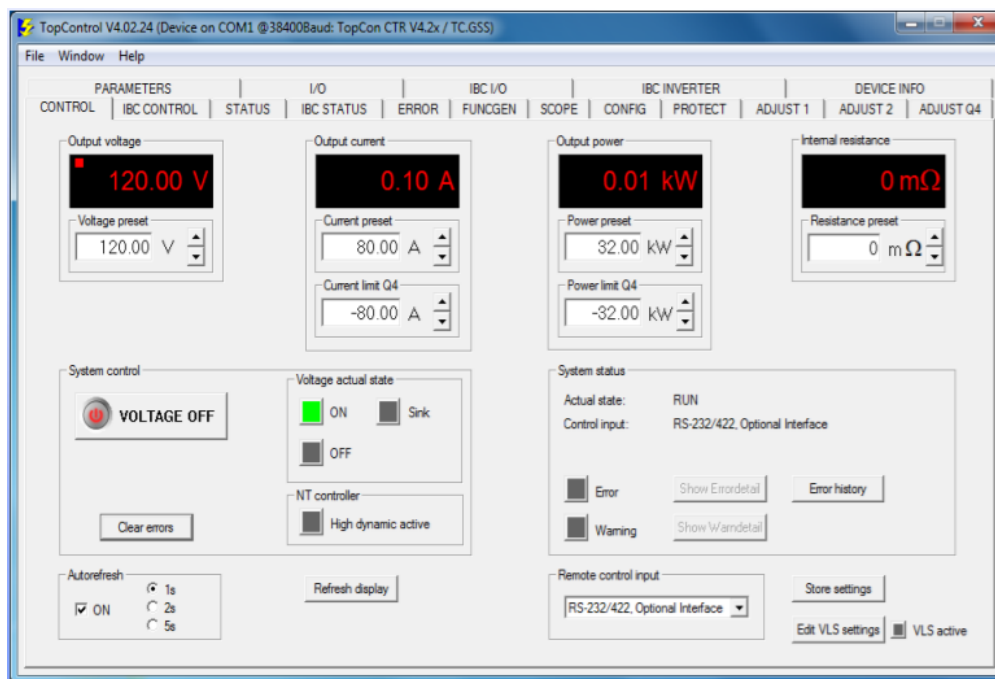


Fig. 20. Pantalla principal del programa. Font: Regatron.

3.2.2. APS AC/DC Load Gui

El software permet controlar la càrrega electrònica des d'un PC amb funcionalitats addicionals al control manual des del panell frontal:

- Registre de dades de tensió, intensitat i potència en mode DC o V_{rms} , I_{rms} , Potència i Potència Aparent en mode AC.
- Control de 3 càrregues en configuració trifàsica.

Bàsicament amb el software es pot fer el mateix que amb el panell frontal però des d'un ordinador i de forma remota. Es poden configurar també els valors de consigna i es pot posar en funcionament la càrrega (LOAD), a més a més de totes les altres funcionalitats.

A continuació es veuen dues imatges on es pot veure l'aspecte del programa APS AC/DC Load Gui.



Fig. 20. Pantalla d'inici del programa on es pot triar la interfície que s'utilitza, el model de la càrrega i el mòdul. Font: Adaptive Power.



Fig. 21. Pantalla principal del programa. Font: Adaptive Power.

3.2.3. LabVIEW

Aquesta és una plataforma i entorn de desenvolupament de sistemes de l'empresa National Instruments, que usa un llenguatge de programació visual gràfic. S'ha utilitzat aquest programa donat que el Regatron és compatible amb aquest (hi ha uns exemples de programes per aquest que es poden descarregar i té una sèrie de subprogrames desenvolupats que fan que la

programació sigui més fàcil i sobretot accessible. Aquests subprogrames es poden veure en els annexos).

El llenguatge usat s'anomena llenguatge G, on la lletra G simbolitza el llenguatge Gràfic. Els programes desenvolupats en LabVIEW s'anomenen Instruments Virtuals o VIs i els subprogrames, subVIs. A continuació es presenta una imatge on es veu l'estètica del programa.

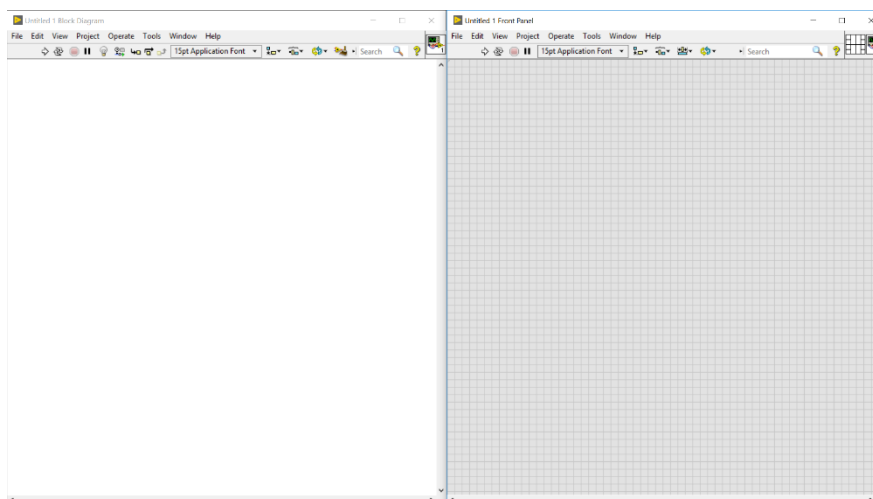


Fig. 22. Pantalla principal del programa. Font: LabVIEW.

Tal i com es veu aquest programa presenta dues pantalles. La primera és el “front panel” i la segona el “block diagram”. La primera pantalla és el programa pròpiament dit on es defineix la seva funcionalitat (aquesta seria bàsicament la part de programació) i la segona és la interfície amb la qual l’usuari interactua quan el programa s’està executant.

Per a l’execució correcta del programa amb LabVIEW s’han d’instal·lar una sèrie de drivers proporcionats per l’empresa Regatron, els quals són imprescindibles per tal de poder comunicar-se amb el dispositiu i fer-lo córrer de forma adequada. Aquests drivers són un conjunt d’arxius .dll que simplement es posen en la mateixa carpeta que es té el programa de LabVIEW per què tot funcioni correctament.

Un cop s’han vist els dispositius que s’han usat per a programar el simulador del supercondensador, es veurà primerament com s’ha realitzat la modelització del supercondensador i com s’ha fet servir en el programa realitzat amb LabVIEW.

4. Modelització del supercondensador

Com qualsevol component que té un comportament complex, no hi ha una sola manera de modelitzar-lo i s'utilitzarà la més estudiada i coneguda. Aquesta manera està descrita per l'estàndard IEC 62391, que s'usa per modelitzar el comportaments dels EDLCs, i que tal i com es veu en la figura següent, el supercondensador es tradueix en un circuit format per una capacitat, una resistència en sèrie equivalent i una en paral·lel.

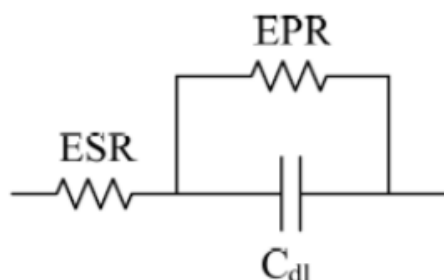


Fig. 23. Esquema equivalent del supercondensador. Font: PPM Power.

Per a poder deduir la modelització del supercondensador es veurà què li succeeix a aquest circuit en condicions de càrrega i descàrrega a intensitat constant (font de corrent).

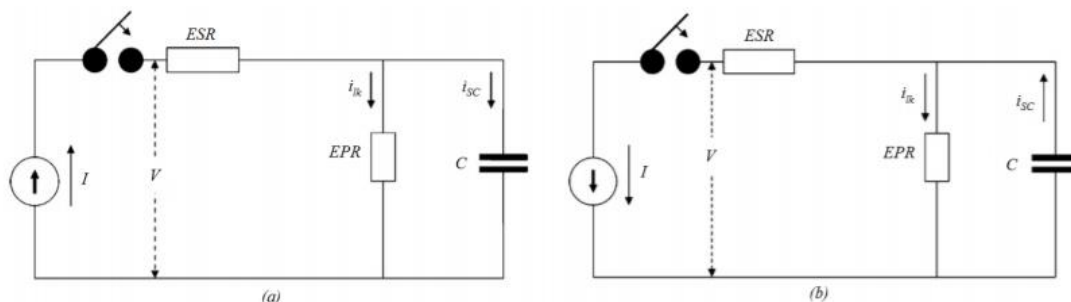


Fig. 24a i 24b. Esquema equivalent per a càrrega i descàrrega a corrent constant.

Font: PPM Power.

A la figura 9 tenim que:

- ESR: resistència en sèrie equivalent.
- EPR: resistència en paral·lel equivalent.
- I: intensitat de càrrega o descàrrega.
- C: capacitat del supercondensador.
- V_{sc} : tensió de la capacitat.
- I_{sc} : intensitat que recorre la capacitat.
- V: tensió total del supercondensador.

Assumint condicions inicials de $t=0$ i $V=0$, tenim la següent equació per a la càrrega:

$$C \frac{dV_{sc}}{dt} + \frac{V_{sc}}{EPR} - I = 0 \quad (11)$$

Resolent l'equació ens queda que la tensió als borns de la capacitat és igual a:

$$V_{sc} = I \cdot EPR \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{EPR \cdot C}\right)} \right) \quad (12)$$

D'on es pot deduir que la tensió als borns del supercondensador és:

$$V = I \cdot ESR + I \cdot EPR \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{EPR \cdot C}\right)} \right) \quad (13)$$

D'aquí es pot deduir que per a $t=0$, el supercondensador es trobarà a una tensió igual a $I \cdot ESR$, i quan el temps tendeix a infinit, la tensió serà igual a $V=I \cdot ESR + I \cdot EPR$. Tanmateix, la tensió màxima ($V_{m\grave{a}x}$) a la qual es carregarà el condensador serà la de les seves especificacions.

De l'equació 13 es pot deduir el temps que es necessita per carregar el supercondensador fins a un valor concret de tensió seguint el següent:

$$t_{tc} = -EPR \cdot C \cdot \ln \left(1 - \frac{V - I \cdot ESR}{I \cdot EPR} \right) \quad (14)$$

Per a la descàrrega, tenim l'equació següent:

$$\frac{1}{C} \int_{t=0}^t i_{sc} dt + i_{sc} \cdot EPR - (V_{m\grave{a}x} + I \cdot EPR) = 0 \quad (15)$$

Resolent l'equació ens queda que la tensió als borns de la capacitat és igual a:

$$V_{sc} = V_{m\grave{a}x} - (V_{m\grave{a}x} + I \cdot EPR) \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{EPR \cdot C}\right)} \right] \quad (16)$$

D'on es pot deduir que la tensió als borns del supercondensador és igual a:

$$V = -I \cdot ESR + V_{m\grave{a}x} - (V_{m\grave{a}x} + I \cdot EPR) \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{EPR \cdot C}\right)} \right] \quad (17)$$

De l'expressió anterior es pot deduir el temps que es necessita per una descàrrega completa seguint la fórmula següent:

$$t_{td} = -EPR \cdot C \cdot \ln\left(\frac{I \cdot EPR}{V_{m\acute{a}x} + I \cdot EPR}\right) \quad (18)$$

Aquestes equacions s'usaran pel modelatge del supercondensador mitjançant programació amb LabVIEW, que és la plataforma que s'ha usat per a la realització del software d'aquest TFG. Es veurà que s'han de modificar per a la programació ja que ara s'han expressat per a un temps continu, i amb el programa s'han d'executar per a temps discrets.

5. Simulador

A continuació es veu el VI que s’ha realitzat amb aquest programa per a controlar la font programable com si fos un supercondensador. A les figures següents es veu el programa general. S’explicarà el seu funcionament a grans trets i en més detall la part de codi que està relacionada amb la modelització del supercondensador. Finalment, també es farà un petit manual de com connectar tots els dispositius entre si i com fer servir el programa.

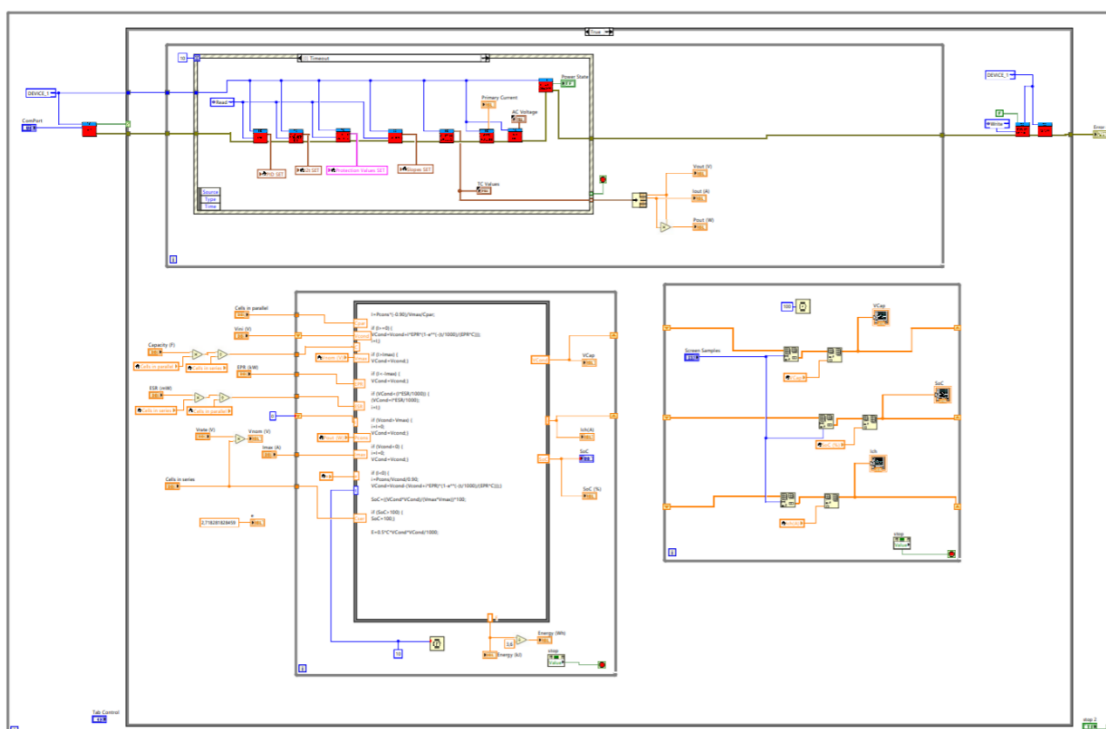


Fig. 25. “Block Diagram” del simulador amb LabVIEW. Font: pròpia.

A la figura anterior es veu la pantalla del “block diagram” del programa, que tal i com s’ha explicat, és la finestra de l’aplicació on s’escriu la programació. Aquest consta d’una sèrie de cicles “while” relacionats els uns amb els altres. Cada cicle es dedica a fer una acció en concret.

A les figures següents s’explicarà cada part d’aquest programa amb més detall.

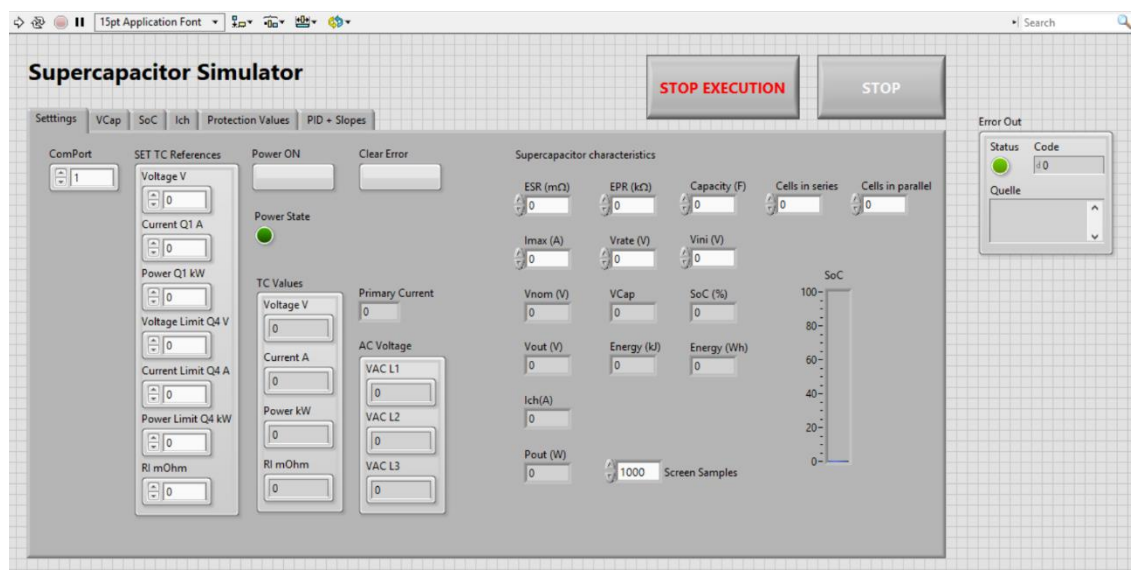


Fig. 26. "Front Panel" del simulador amb LabVIEW. Font: pròpia.

A la figura anterior es veu la pantalla principal del programa. En aquesta pantalla es troben els següents elements:

- Controls per configurar les característiques d'un supercondensador determinat: l'ESR; l'EPR, la capacitat, les cel·les en sèrie i en paral·lel, la intensitat màxima de funcionament, la tensió del supercondensador i la tensió a la que es troba al inici.
- Indicators que visualitzen les següents variables en temps real: la tensió nominal, la tensió a la que es troba el condensador, la SoC, la tensió de sortida, l'energia en kJ i kWh, la intensitat de càrrega/descàrrega, i la potència de sortida.
- Controls per a determinar les referències per al Regatron: tensió, corrent, potència, resistència interna i límits.
- Indicators on es visualitzen els valors de sortida de tensió, corrent, potència i resistència interna i els valors d'entrada de tensió i corrent que s'usa per alimentar el Regatron.
- Control per triar el port amb el qual es comunica amb el dispositiu.
- Botó que s'usa per a encendre el Regatron (Power ON) i "LED" que visualitza si aquest ho està o no ("Power State").
- Botó per netejar els errors.
- Indicador que visualitza l'estat de càrrega del supercondensador.
- Control per determinar la mida de les gràfiques que treu el programa.
- Gràfiques que es troben a les pestanyes Vcap, SoC i Ich.

- Pestanyes on es visualitzen els valors de protecció, els PID i els “slopes”. Aquests valors es configuren per defecte mitjançant un subVI que proporciona Regatron.
- Botó STOP per parar l’execució del programa i que té la possibilitat de reprendre’l. Quan es prem passa a ser GO.
- Botó STOP EXECUTION per parar completament l’execució del programa.
- S’ha de tenir en compte que per a fer córrer el programa simplement s’ha de prémer el botó RUN del LabVIEW (⇨).

A la figura següent es veu el primer cicle “while” on es troben les parts més importants del programa. Aquest consta d’una estructura d’esdeveniments en la qual depenent del que succeeix en el programa s’executa una cosa o una altra. També es veu que en aquesta part s’agafen els valors de sortida de tensió, intensitat i potència del Regatron.

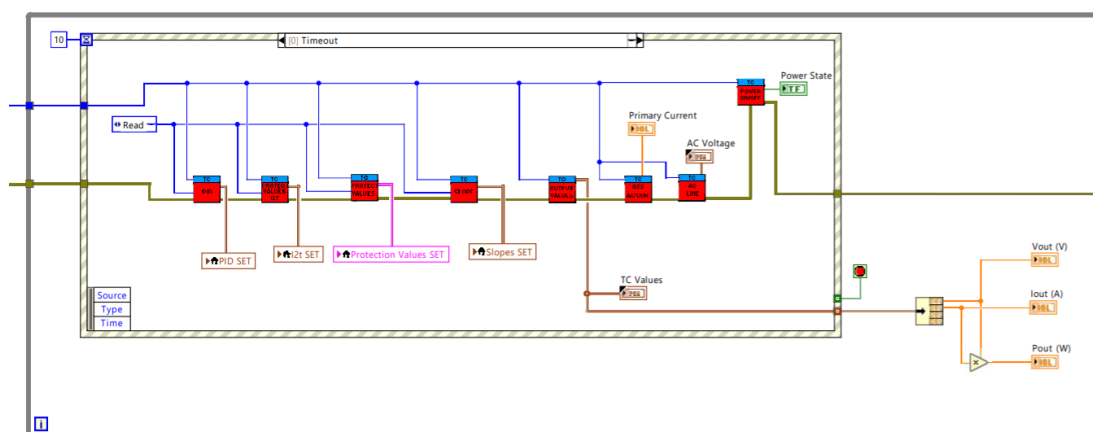


Fig. 27. El primer cicle “while” del programa. Font: pròpia.

A les figures següents es veuen els diferents esdeveniments que tenim dintre del primer cicle “while”.

La primera pantalla correspon als diferents indicadors del programa (els sets, els valors de sortida del Regatron, l’indicador d’estat...). La segona pantalla correspon al botó de neteja d’errors. La tercera pantalla correspon al botó d’engegada del Regatron (power ON) i als controls de les referències d’aquest. La quarta pantalla correspon al STOP. I l’última pantalla correspon als diferents subVIs proporcionats pel Regatron, els quals tal i com s’ha dit, ja venen predefinitos.

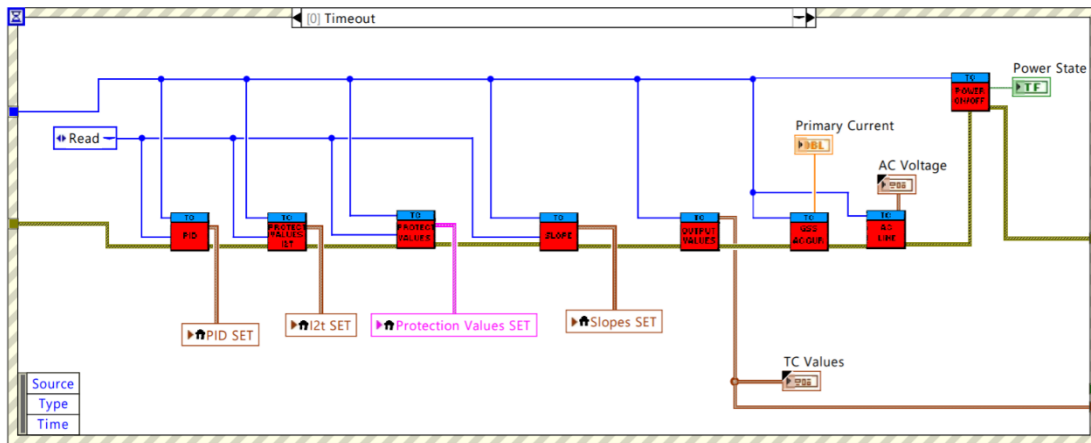


Fig. 28. Primera pantalla d'esdeveniments. Font: pròpia.

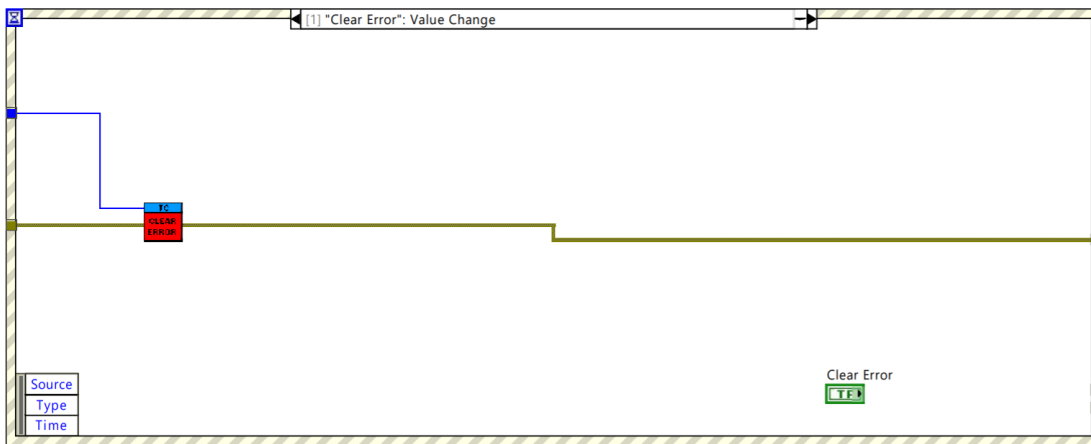


Fig. 29. Segona pantalla d'esdeveniments. Font: pròpia.

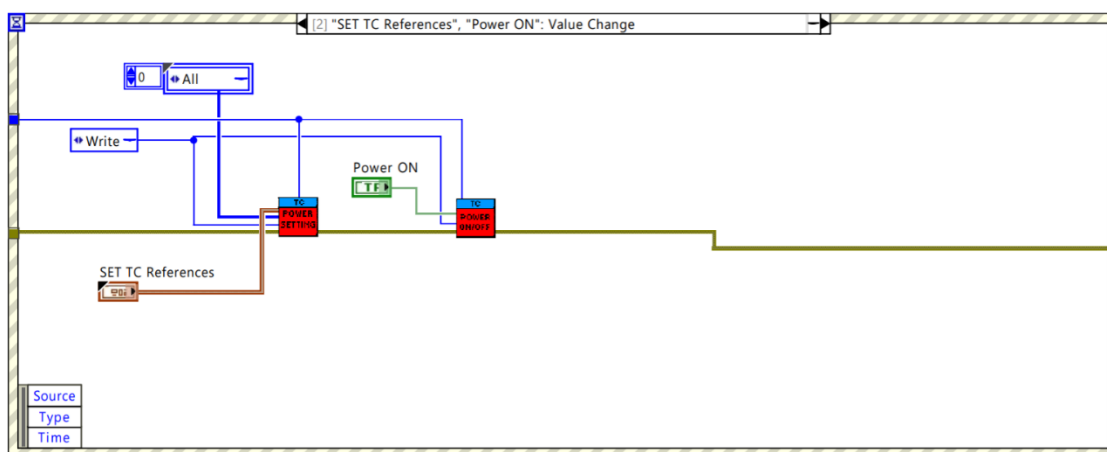


Fig. 30. Tercera pantalla d'esdeveniments. Font: pròpia.

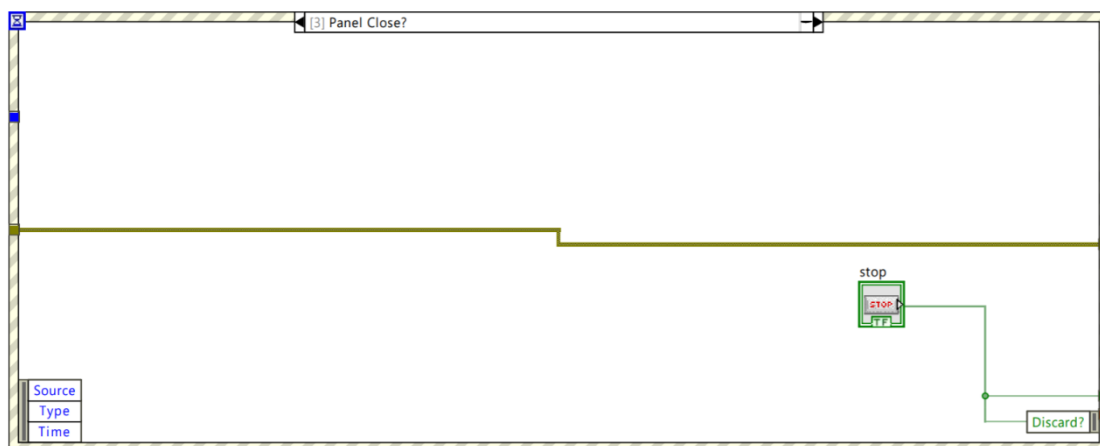


Fig. 31. Quarta pantalla d'esdeveniments. Font: pròpia

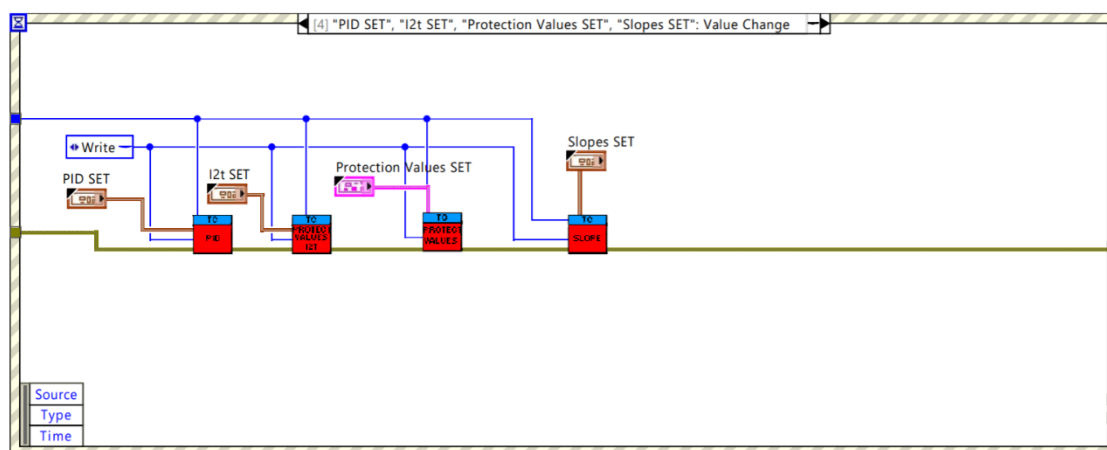


Fig. 32. Quinta pantalla d'esdeveniments. Font: pròpia.

A la següent figura es veu el segon cicle “while” del programa. En aquest es troba la part de la modelització del supercondensador. El programa funciona amb temps discrets que venen determinats per intervals de 10 ms. Cada 10 ms el programa calcula el valor de les diferents variables que aquest presenta i després aquests es processen i es visualitzen en les gràfiques i indicadors pertinents.

Es veu que la capacitat, l'ESR i la tensió del supercondensador es configura fora del cicle “while” seguint les fórmules 8, 9 i 10 respectivament. La majoria de les altres variables es configuren mitjançant la inserció del codi de LabVIEW, el qual s'explicarà en la pàgina següent.

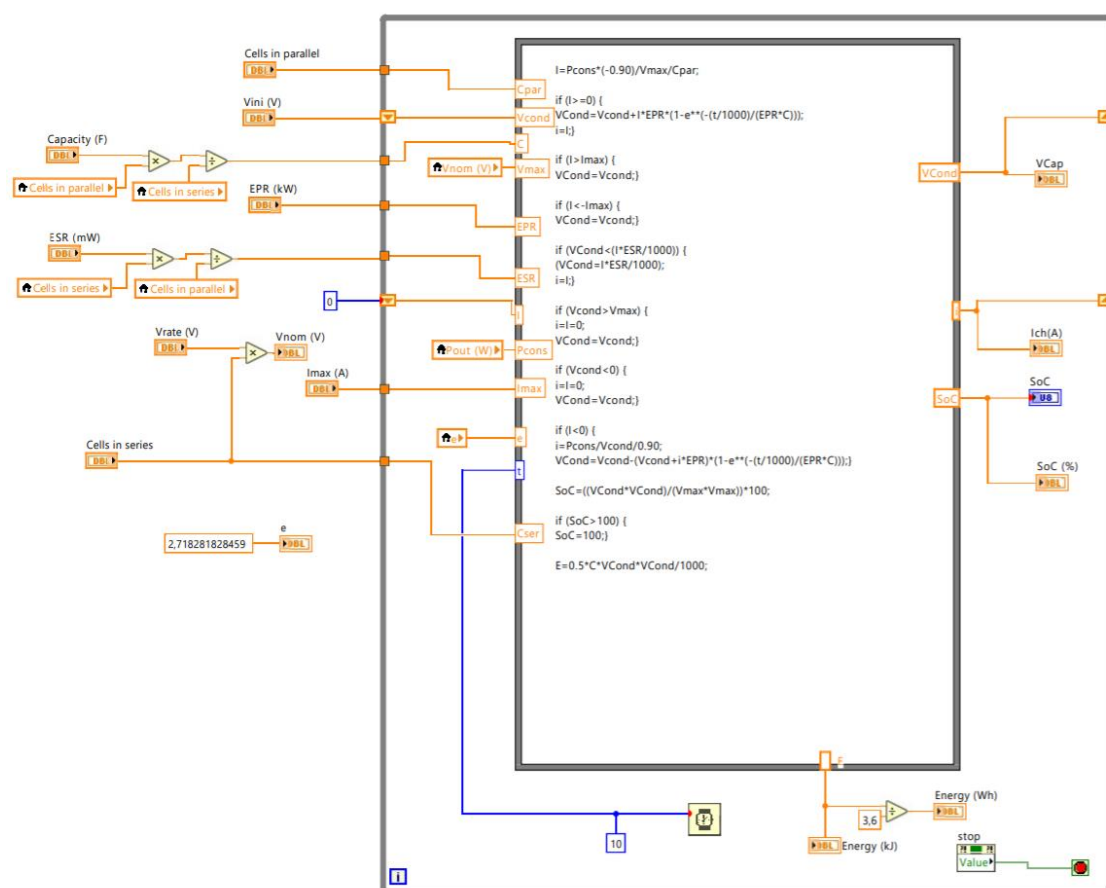


Fig. 33. El segon cicle “while” del programa. Font: pròpia.

A la figura següent es presenta el tercer cicle “while” del programa. En aquest cicle es defineixen les gràfiques que es volen visualitzar al simulador. En total hi ha tres gràfiques que es poden veure a les diferents pestanyes del panell frontal: la tensió del condensador, l’estat de càrrega i la intensitat de càrrega/descàrrega.

En aquest cicle també es defineix la quantitat de mostres que es volen tenir a la gràfica i el temps que es triga en representar cada mostra.

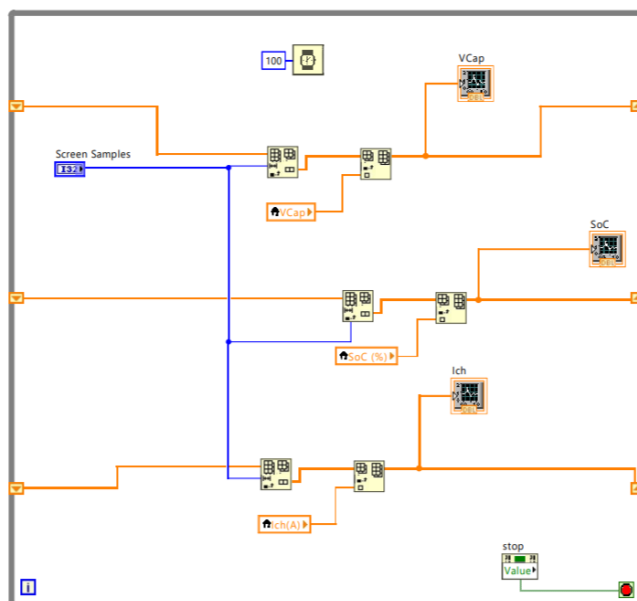


Fig. 34. El tercer cicle “while” del programa. Font: pròpia.

5.1. Explicació del codi

A continuació es farà l’explicació del codi que s’ha usat per a programar el simulador, basat en la modelització del supercondensador.

La primera línia correspon al càlcul de la intensitat de càrrega de supercondensador. Es multiplica per 0.90 degut al rendiment del convertidor que hi hauria enmig de la font i el supercondensador. Aquest valor variaria en funció del convertidor, però com que aquest és “fictici” s’ha agafat aquest valor típic per defecte.

$$1. I = P_{cons} * (-0.90) / V_{max} / C_{par};$$

A les següents línies es calcula la tensió al condensador per la càrrega ($I > 0$). El seu càlcul està basat en la fórmula 13. Tal i com s’ha anat dient, les fórmules de la modelització del supercondensador estan basades en temps continus i s’han d’adaptar a temps discrets (interval de temps). Llavors tenim que les constants desapareixen i solament es queden aquells valors dependents del temps. El valor per al temps final serà igual al valor del condensador per al temps inicial més l’increment.

Això succeeix en totes aquelles parts del codi que són dependents del temps. A la quarta línia tenim que $i=I$, on la variable i s'usa per a realitzar la gràfica de la corrent en funció del temps (independent si és de càrrega o descàrrega). [El codi de LabVIEW tal i com es pot intuir, distingeix entre minúscules i majúscules].

```
2. if (I>=0) {
3. VCond=Vcond+I*EPR*(1-e**(-(t/1000)/(EPR*C)));
4. i=I;}
```

A les següents línies s'afegeix la condició que si la corrent supera el màxim permès (tant pel límit inferior com pel superior), la tensió del supercondensador es queda igual.

```
5. if (I>Imax) {
6. VCond=Vcond;}
```

```
7. if (I<-Imax) {
8. VCond=Vcond;}
```

A continuació es té que la tensió del supercondensador no pot baixar del seu mínim. És a dir, per molt que hi hagi demanda de corrent, aquest no en podrà proporcionar.

```
9. if (VCond<(I*ESR/1000)) {
10. (VCond=I*ESR/1000);
11. i=I=0;}
```

A les següents línies es té que si la tensió del supercondensador arriba al seu màxim, la intensitat caurà dràsticament fins a 0. Aquest fet s'ha explicat quan s'han presentat les corbes de càrrega i descàrrega en la primera part del projecte.

```
12. if (Vcond>Vmax) {
13. i=I=0;
14. VCond=Vcond;}
```

Seguidament es tenen les línies de codi que s'han usat per a la descàrrega del supercondensador. Succeeix el mateix que amb la càrrega. En la línia 16 es té que la intensitat de descàrrega s'ha de dividir entre el rendiment del convertidor.

```

15. if (I<0) {
16. i=Pcons/Vcond/0.90;
17. VCond=Vcond-(Vcond+i*EPR)*(1-e**(-(t/1000)/(EPR*C)));}

```

A la línia 18 es calcula l'estat de càrrega del supercondensador seguint la fórmula 3.

```

18. SoC=((VCond*VCond)/(Vmax*Vmax))*100;

```

A les línies següents es té la limitació de que l'estat de càrrega no supera el 100% de la capacitat total de supercondensador.

```

19. if (SoC>100) {
20. SoC=100;}

```

Finalment, l'última línia s'usa per calcular l'energia que hi ha al supercondensador seguint la fórmula 3.

```

21. E=0.5*C*VCond*VCond/1000;

```

Tal i com es veu, el codi és curt degut a que la majoria de les funcions del LabVIEW ja venen especificades de forma gràfica i són poques les accions que s'han de determinar mitjançant codi escrit.

5.2. Muntatge

A continuació es veu un senzill esquema del muntatge que s'ha realitzat per a la simulació de la càrrega del supercondensador i posteriorment el muntatge realitzat per a la simulació de la descàrrega del supercondensador.

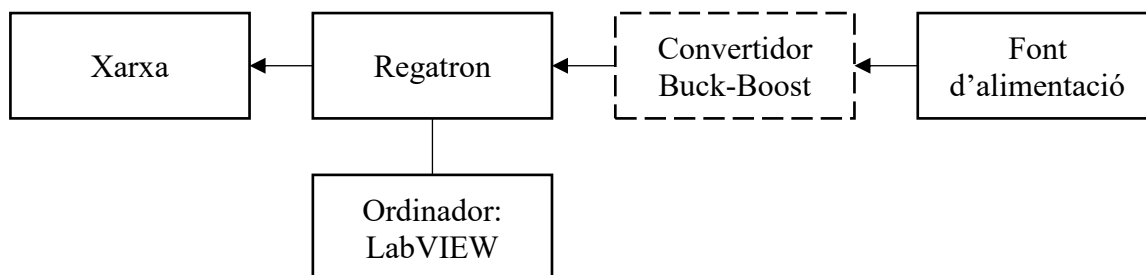


Fig. 35. Esquema del muntatge per a la simulació de la càrrega del supercondensador.

En aquest primer cas s'usa la font d'alimentació per descarregar energia sobre el Regatron. Teòricament hi hauria un convertidor específic per tal de regular correctament la tensió i la corrent que el condensador rep. Com el laboratori no disposa d'aquest convertidor simplement s'ha considerat el seu ús a l'hora de programar el simulador, tenint en compte el seu rendiment i que el corrent seria constant durant la càrrega. En aquest primer cas, l'energia flueix des de la font d'alimentació fins a la xarxa passant pel Regatron.

En el cas de la descàrrega, com aquesta es fa a potència constant i quan el supercondensador es descàrrega el que succeeix és que la seva tensió cau i la intensitat augmenta, el convertidor el que faria és donar una tensió constant d'acord a les característiques de la càrrega. Si la potència de descàrrega no fos constant, simplement mantindria la tensió constant i la intensitat pujaria o baixaria segons la demanda de la càrrega. En aquest segon cas, l'energia flueix des de la xarxa fins a la càrrega programable, on es dissipa en forma de calor.

Simulació de descàrrega del supercondensador:

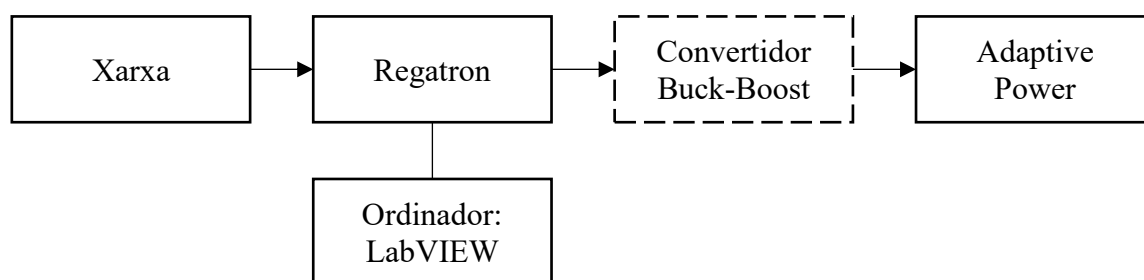


Fig. 36. Esquema del muntatge per a la simulació de la descàrrega del supercondensador.

Simplement, s'ha fet funcionar el Regatron a una tensió i corrent constants un cop determinats els seus valors de consigna (com si ja tingués implementat un convertidor). En canvi, a les gràfiques de càrrega i descàrrega del supercondensador s'observa com és el seu funcionament real. Això es pot trobar en l'apartat on es presenten els resultats de les simulacions.

5.3. Passos a seguir per una correcta simulació

Per realitzar la simulació correctament amb el LabVIEW s'han de seguir els passos següents:

- Endollar els diferents elements que s'usen per la simulació.
- Unir els diferents elements mitjançant els cables corresponents.
- Connectar l'ordinador amb el Regatron mitjançant cable RS232.
- Configurar la font d'alimentació o la càrrega programable en el cas corresponent (ja sigui de forma manual o mitjançant software).
- Obrir el simulador de LabVIEW i determinar els valors del supercondensador que es vulgui simular. Determinar els valors de consigna del Regatron. Determinar el COM al que estigui connectat el cable RS232.
- Encendre el Regatron i posar-lo en mode remot.
- Al simulador, clicar a "Power ON" i tot el conjunt es posarà en marxa.
- S'ha de tenir en compte que un cop s'ha acabat l'experiment i s'ha clicat en "STOP", s'ha de tornar a clicar en "Power ON" per tal parar el conjunt. Després d'això ja es pot clicar en "STOP EXECUTION" per tancar l'execució del programa.
- Un cop s'ha realitzat l'experiment, es poden treure els diversos valors de les gràfiques amb un full de càlcul, es pot guardar la configuració determinada i tot allò que ens permeti el LabVIEW.

6. Simulacions realitzades al laboratori

En aquest projecte s'han realitzat una sèrie de simulacions de les corbes de càrrega i descàrrega del supercondensador per a comprovar el correcte funcionament del supercondensador. En aquest, s'han considerat diferents escenaris de simulació, els quals s'explicaran a continuació. Es veuran els resultats obtinguts de les simulacions i es compararan amb els esperats.

6.1. Escenari 1. Càrrega.

En aquest primer escenari s'ha dut a terme la simulació en les condicions següents:

- El Regatron funciona com a càrrega. El supercondensador es carrega.
- Les característiques del supercondensador es poden trobar al *datasheet* que hi ha als annexos.
- S'ha usat una font d'alimentació que treballa a 56V i 1,95A.
- El supercondensador es troba en un estat inicial de 2V.

Els resultats de la simulació els podem veure en les figures següents:

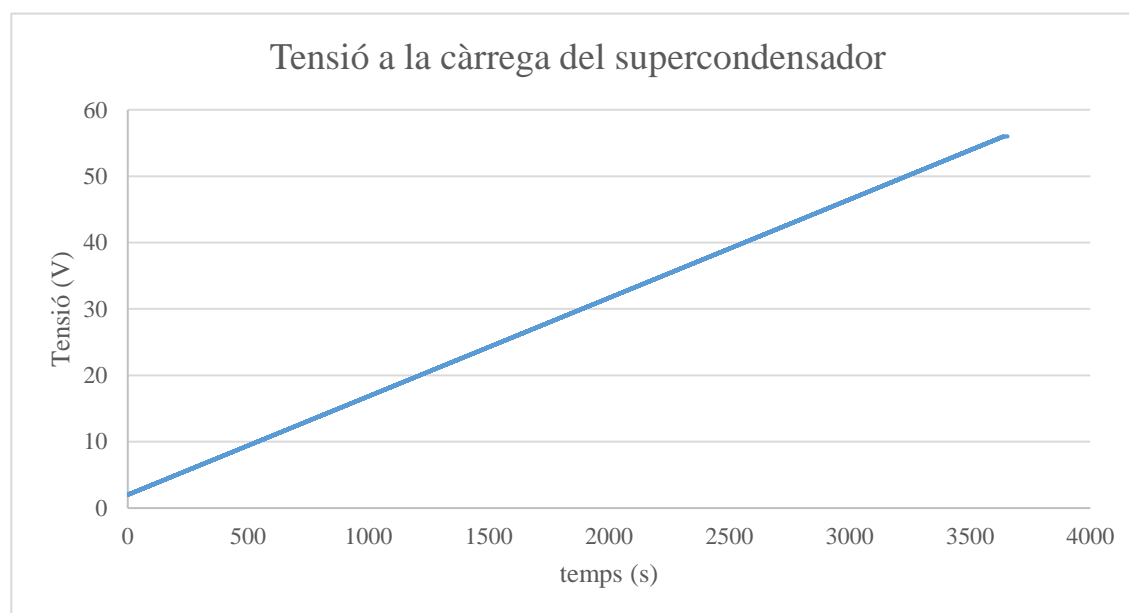


Fig. 37. Tensió al supercondensador a la càrrega per al primer escenari. Font: pròpia.

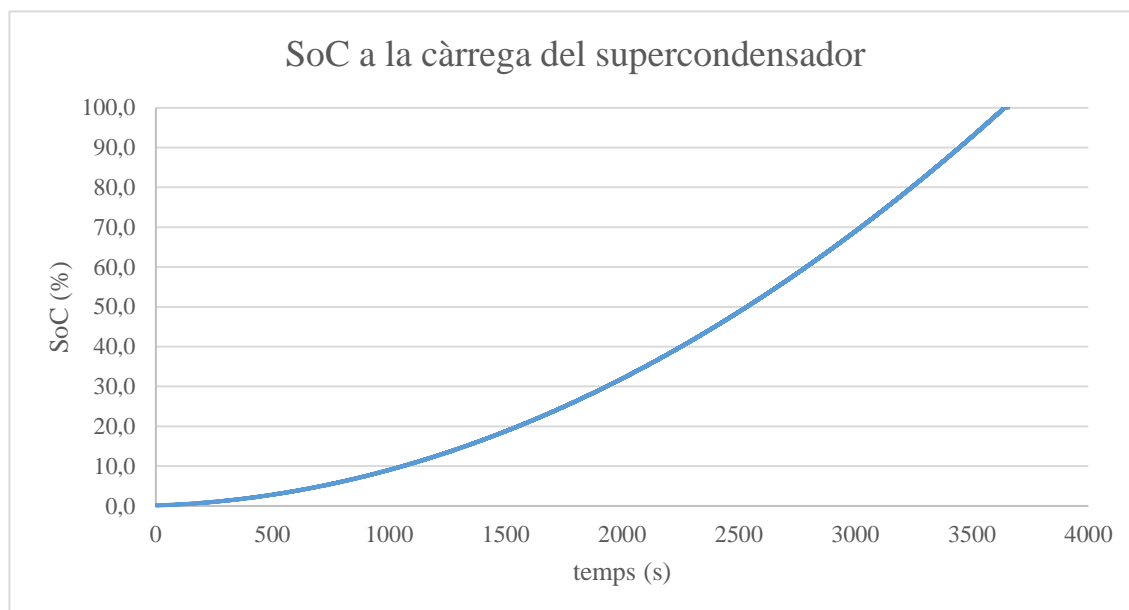


Fig. 38. SoC al supercondensador a la càrrega per al primer escenari. Font: pròpia.

Tal com es pot veure en la figura 38, el resultat és l'esperat ja que la tensió augmenta de forma constant, mentre que l'estat de càrrega ho fa de forma parabòlica (seguint la fórmula 3).

Seguint l'equació 14 es pot calcular el temps que triga el supercondensador a carregar-se amb les especificacions determinades. Com aquesta equació té la referència al 0, per calcular el temps de càrrega del supercondensador, primerament s'haurà de calcular el temps per a carregar-se fins els 56V, el temps per a carregar-se fins els 2V i restar els dos valors.

$$t_{tc} (56V) = 3732,8s$$

$$t_{tc} (2V) = 132,27s$$

$$t_{tc} = 3732,8s - 132,27s = 3600,53s$$

Tal com es pot apreciar aquest temps és el mateix que es veu a la gràfica. Per tant la simulació ha sigut correcta.

6.2. Escenari 2. Càrrega.

En aquest segon escenari s'ha dut a terme la simulació en les condicions següents:

- El Regatron funciona com a càrrega. El supercondensador es carrega.
- Les característiques del supercondensador es poden trobar al *datasheet* que hi ha als annexos.
- S'ha usat una font d'alimentació que treballa a 56V i 3,95A.
- El supercondensador es troba en un estat inicial de 2V.

Els resultats de la simulació els podem veure en les figures següents:

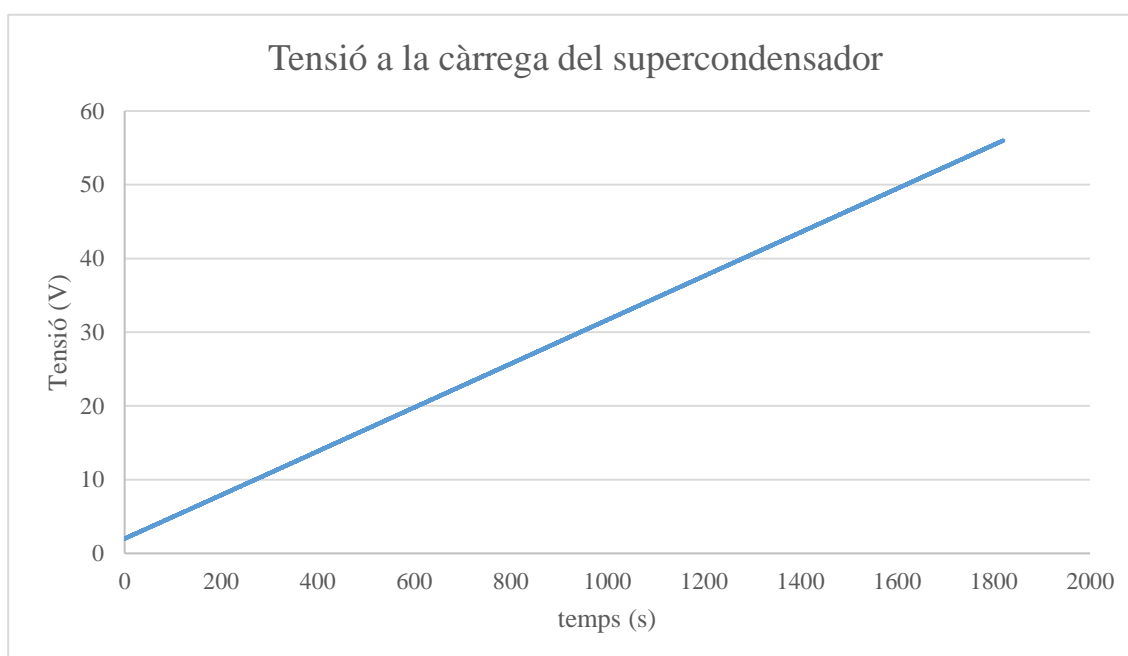


Fig. 39. Tensió al supercondensador a la càrrega per al segon escenari. Font: pròpia.



Fig. 40. Tensió al supercondensador a la càrrega per al segon escenari. Font: pròpia.

Tal com es veu, el resultat és l'esperat ja que la tensió augmenta de forma constant, mentre que l'estat de càrrega ho fa de forma parabòlica (seguint la fórmula 3). Aquest augment es realitza aproximadament al doble de ràpid donat que la intensitat de càrrega és una mica més del doble que la usada en el primer escenari.

Seguint l'equació 14 es pot calcular el temps que triga el supercondensador a carregar-se amb les especificacions determinades.

$$t_{tc} = 1842,10s$$

Tal com es pot apreciar aquest temps és el mateix que es veu en la gràfica. Per tant la simulació ha sigut correcta.

6.3. Escenari 3. Descàrrega.

En aquest tercer escenari s'ha dut a terme la simulació en les condicions següents:

- El Regatron funciona com a font d'alimentació. El supercondensador es descarrega.
- Les característiques del supercondensador es poden trobar al *datasheet* que hi ha als annexos.

- S'ha usat una càrrega que treballa a 56V i 4A. Potència constant de 224W.
- El supercondensador es troba inicialment completament carregat.

Els resultats de la simulació els podem veure en les figures següents:

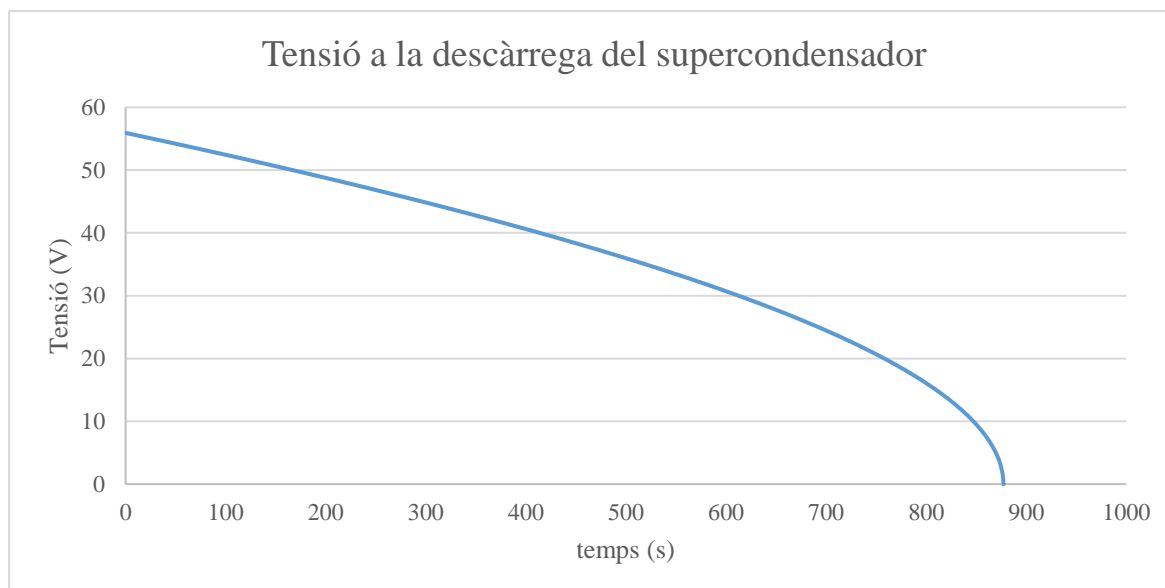


Fig. 41. Tensió al supercondensador a la descàrrega per al tercer escenari. Font: pròpia.

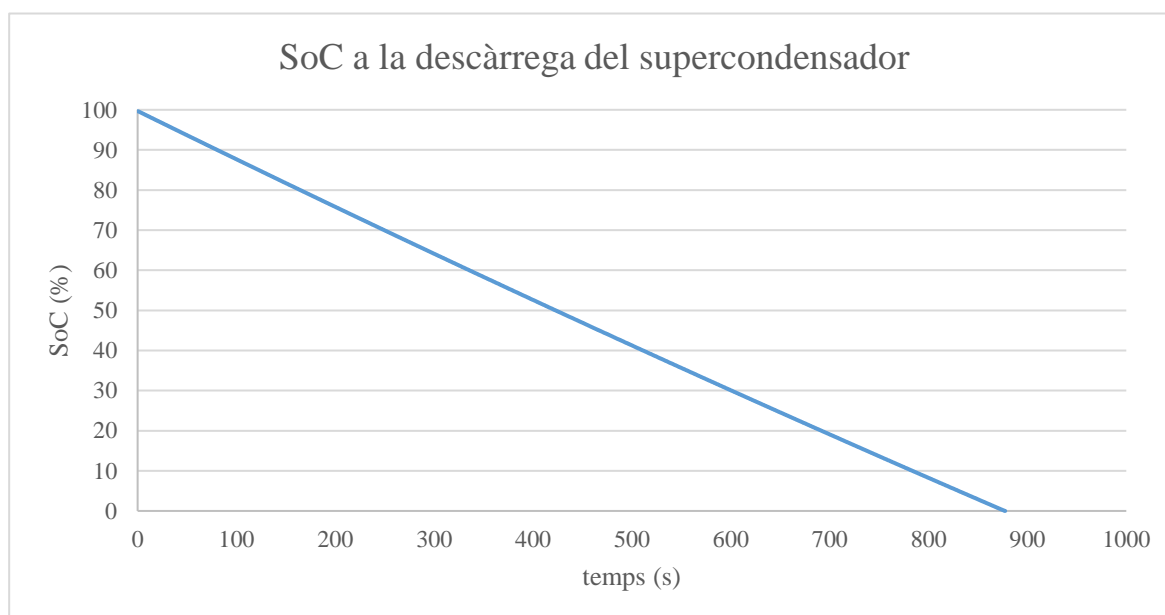


Fig. 42. SoC al supercondensador a la descàrrega per al tercer escenari. Font: pròpia.

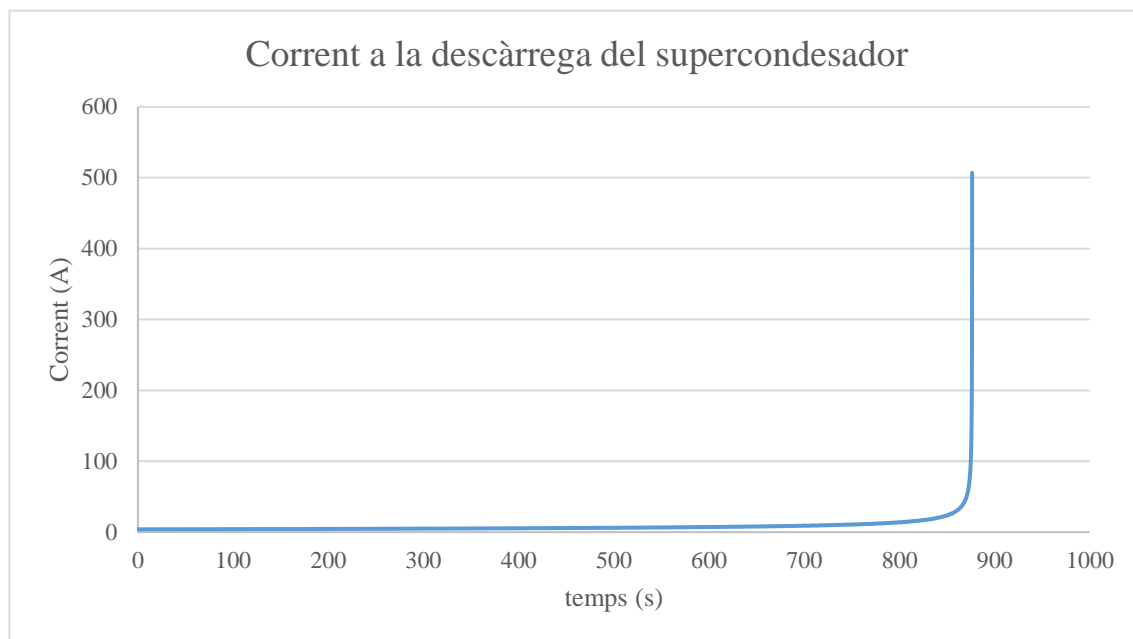


Fig. 43. Corrent al supercondensador a la descàrrega per al tercer escenari. Font: pròpia.

Els resultats d'aquesta simulació tenen una forma similar a la figura 5, que representa la tensió i la corrent en descàrrega a potència constant. La figura 42 que representa el SoC del supercondensador és lineal, ja que la descàrrega es fa de forma constant, a potència constant.

Es pot veure que si es multiplica la tensió per la intensitat, la potència sempre dóna el mateix valor d'aproximadament 224W, tal i com es pot veure representat a la figura 44.

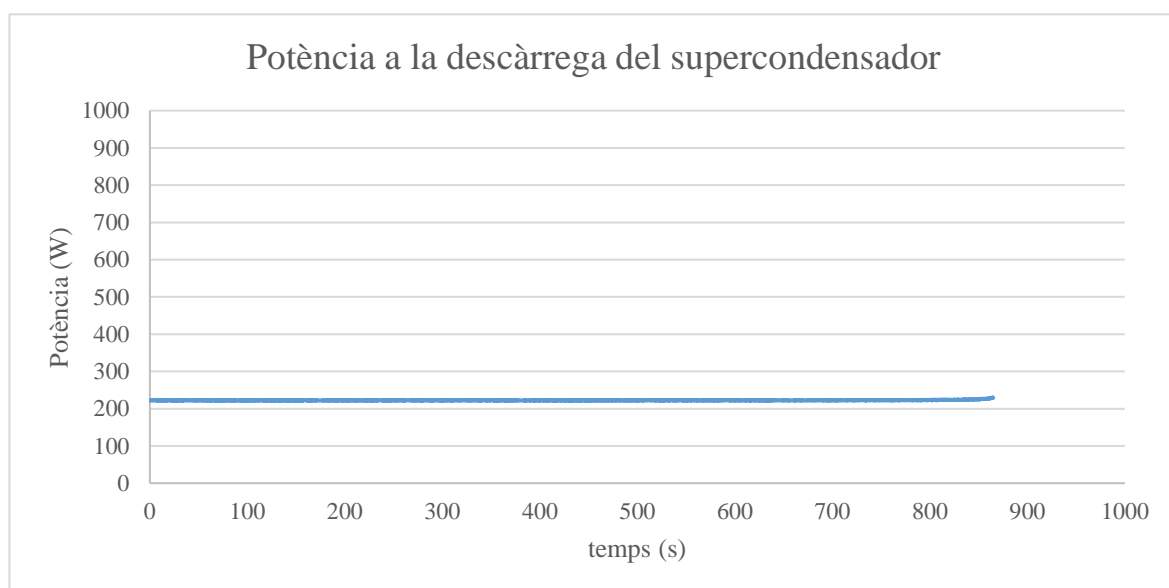


Fig. 44. Potència al supercondensador a la descàrrega per al tercer escenari. Font: pròpia.

Per tal de saber el temps teòric de la descàrrega s'ha de resoldre la igualtat següent:

$$\frac{1}{2}CV^2 = P \cdot t \quad (19)$$

$$t = \frac{1}{2P}CV^2 \quad (20)$$

Substituint pels valors corresponents a la simulació, dona el resultat següent:

$$t = 910s$$

Tal i com es veu en les figures, el temps de descàrrega és aproximadament el mateix al teòric que s'ha calculat. La petita diferència es pot trobar en que la càrrega demandava una mica més de 224W.

6.4. Escenari 4. Descàrrega.

En aquest quart escenari s'ha dut a terme la simulació en les condicions següents:

- El Regatron funciona com a font d'alimentació. El supercondensador es descarrega.
- Les característiques del supercondensador es poden trobar al *datasheet* que hi ha als annexos.
- S'ha usat una càrrega que treballa a 112V i 8A. Potència constant de 896W.
- S'ha agafat una configuració dels supercondensadors de 2 en sèrie i 2 en paral·lel.
- El supercondensador es troba inicialment a 110V.

Els resultats de la simulació els podem veure a les figures següents:

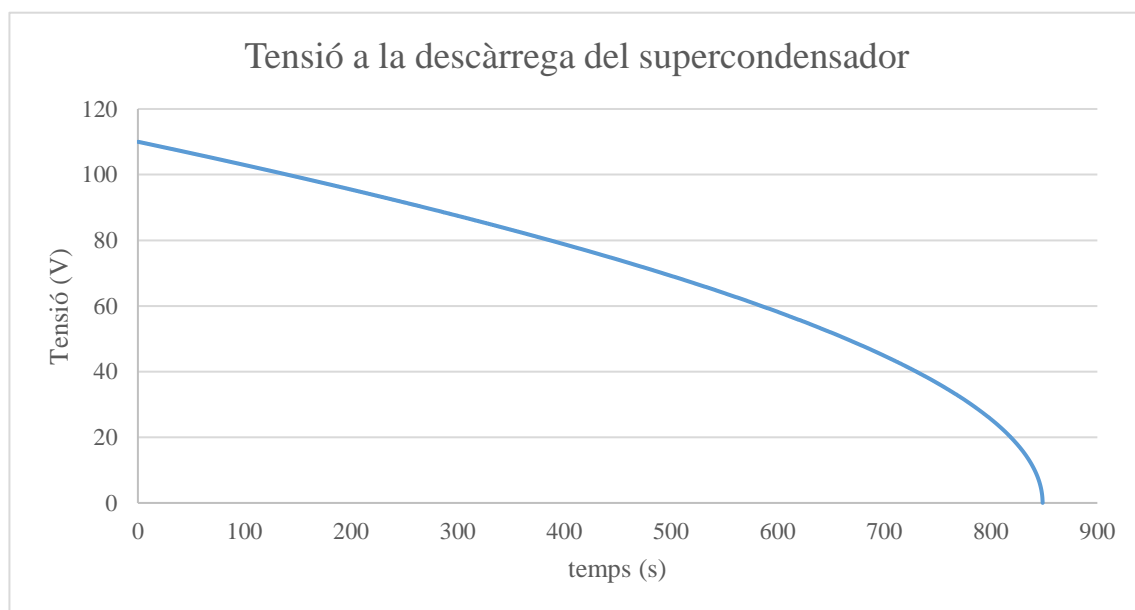


Fig. 45. Tensió al supercondensador a la descàrrega per al quart escenari. Font: pròpia.

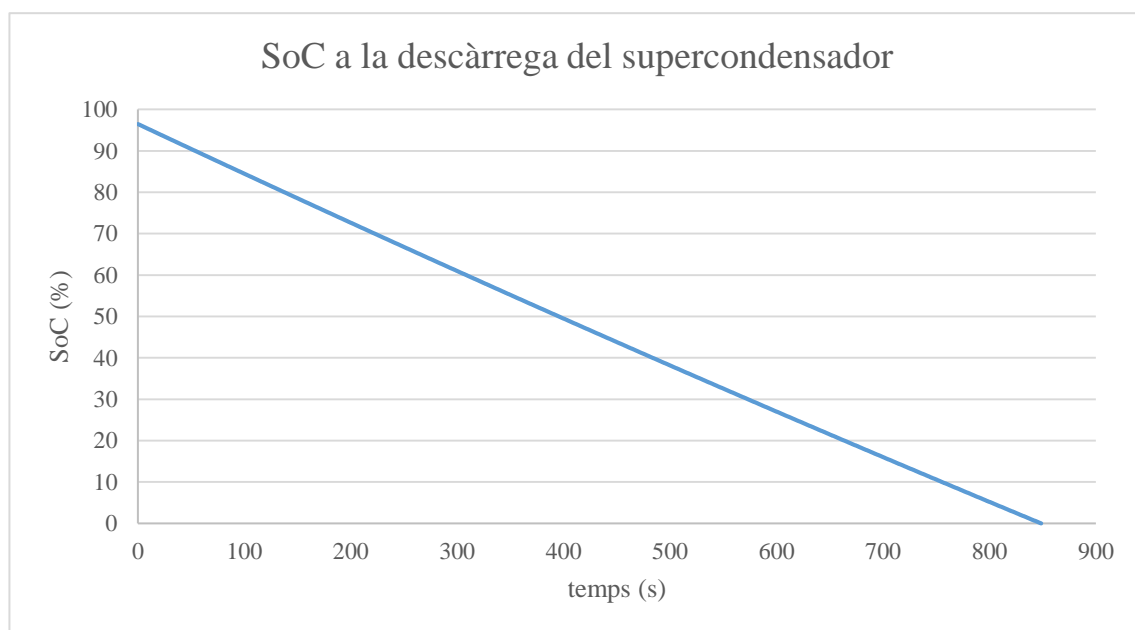


Fig. 46. SoC al supercondensador a la descàrrega per al quart escenari. Font: pròpia.

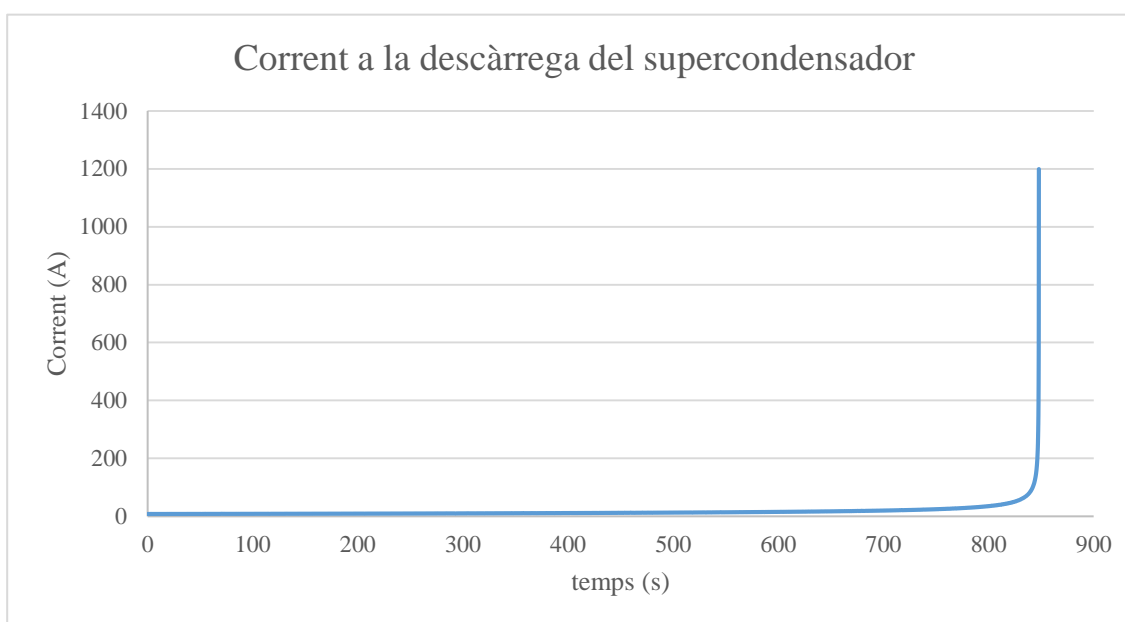


Fig. 47. Corrent al supercondensador a la descàrrega per al quart escenari. Font: pròpia.

Igual que en el cas anterior, els resultats tenen una forma similar a la figura 5. Tenim en aquest cas un temps molt similar de descàrrega. Això es deu a que, seguint la fórmula 8, es veu que la capacitat equivalent és la mateixa que la de l'escenari anterior. En canvi, la tensió és el doble de gran, però la descàrrega també es fa a una intensitat el doble de gran, per tant el temps de descàrrega ha de ser el mateix que en el cas anterior. Si no ho és, és donat que en aquest cas s'ha agafat una tensió inicial de 110V, i no la tensió màxima.

Seguint la fórmula 20, es veu que la tensió de descàrrega teòrica hauria de ser de:

$$t = 877s$$

Tal i com es veu correspon aproximadament al temps de descàrrega que s'ha tingut a la simulació. Com abans, pot haver-hi una petita diferència donat que la càrrega ha demandat una mica més de 896W.

6.5. Escenari 5. Descàrrega.

En aquest cinquè escenari s'ha dut a terme la simulació en les condicions següents:

- El Regatron funciona com a font d'alimentació. El supercondensador es descarrega.

- Les característiques del supercondensador es poden trobar al *datasheet* que hi ha als annexos.
- S'ha usat una càrrega que treballa a 112V i 16A. Potència constant de 1792W.
- S'ha agafat una configuració dels supercondensadors de 2 en sèrie i 2 en paral·lel.
- El supercondensador es troba inicialment carregat completament.

Els resultats de la simulació els podem veure a les figures següents:

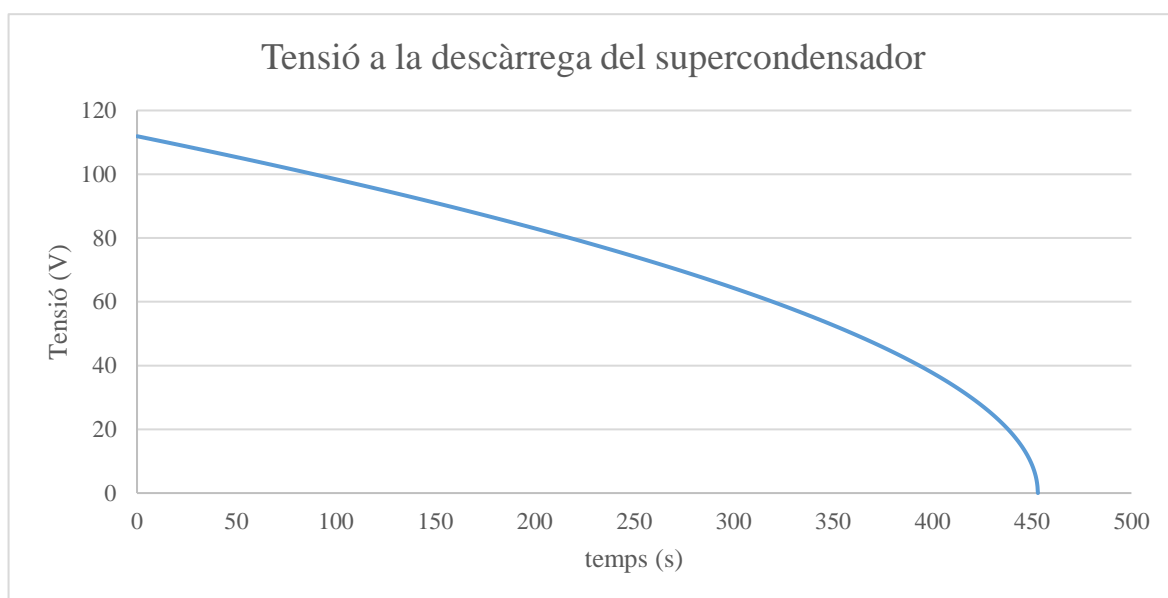


Fig. 48. Tensió al supercondensador a la descàrrega per al cinquè escenari. Font: pròpia.

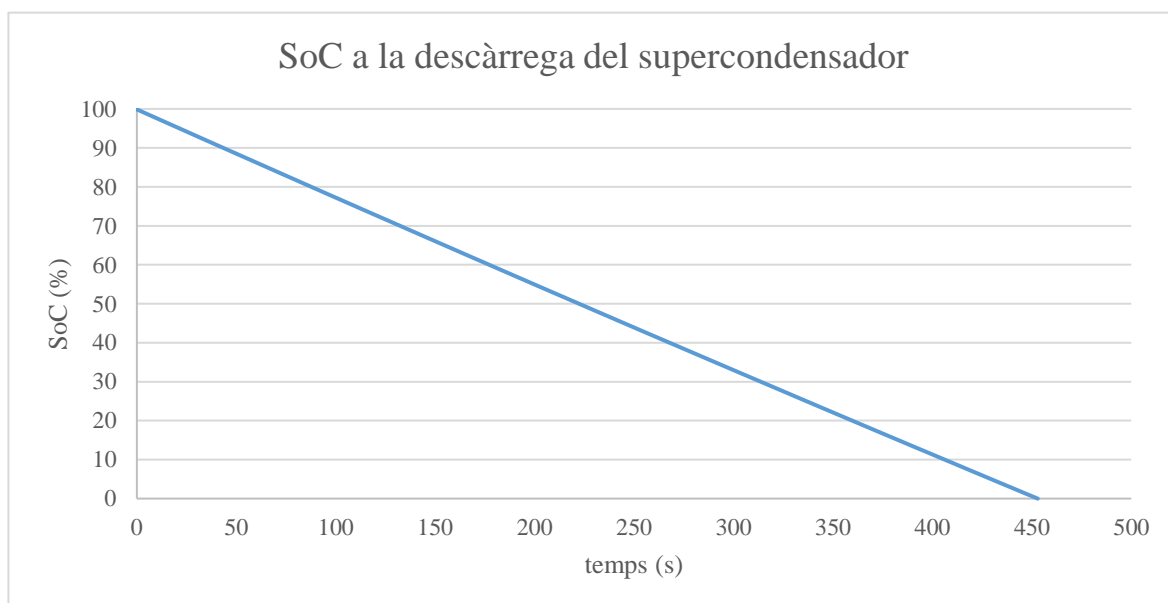


Fig. 49. SoC al supercondensador a la descàrrega per al cinquè escenari. Font: pròpia.

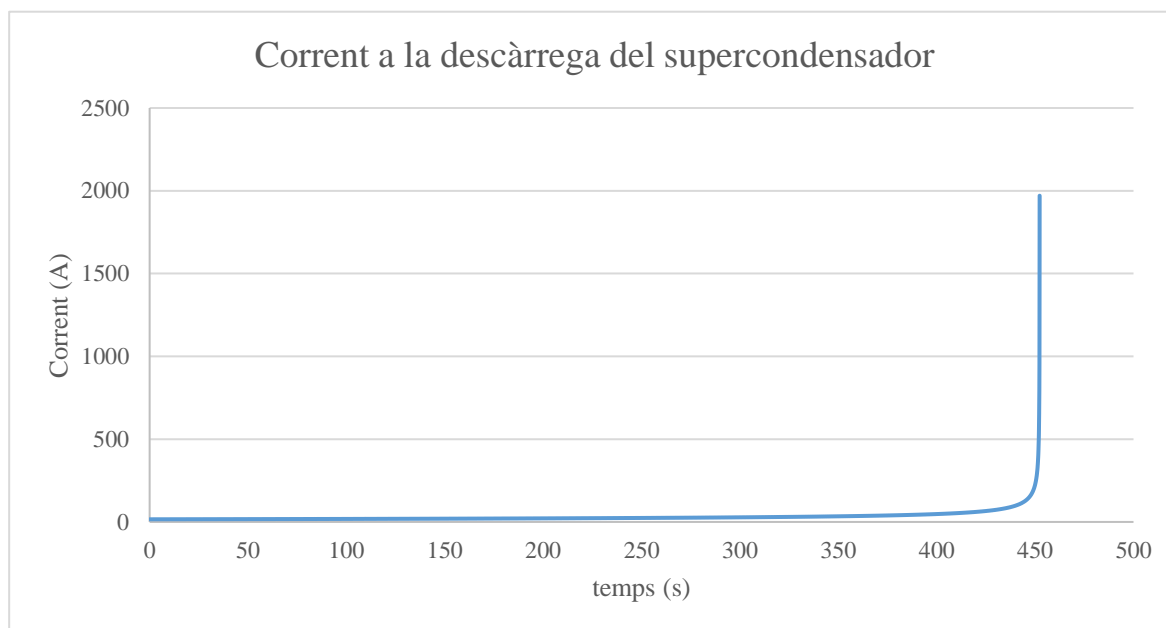


Fig. 50. Corrent al supercondensador a la descàrrega per al cinquè escenari. Font: pròpia.

Igual que en el cas anterior, els resultats tenen una forma similar a la figura 5. En aquest cas, com que la descàrrega s'ha fet al doble de corrent que en el cas anterior, el temps de descàrrega també s'ha reduït a la meitat.

Seguint la fórmula 20, es veu que la tensió de descàrrega teòrica hauria de ser de:

$$t = 455s$$

Tal com es veu, correspon aproximadament al temps de descàrrega que s'ha tingut en la simulació.

Durant totes les simulacions els resultats que s'han obtingut són satisfactoris i es podria dir que el simulador funciona correctament tot i les seves limitacions. Normalment, els supercondensadors es descarreguen a corrents molt més elevats, però no s'ha pogut fer servir aquests corrents tan elevats en el laboratori per qüestions de seguretat.

Tot i això, s'ha pogut veure el funcionament del simulador amb corrents més petits i es veu que aquest podria funcionar perfectament amb corrents més elevades.

Aquest simulador s'ha basat en una modelització del supercondensador senzilla. Hi ha altres formes de modelitzar els supercondensadors, però precisen del coneixement d'una sèrie de valors que no es poden trobar de forma natural en els catàlegs que proporcionen els fabricants.

Cal tenir els supercondensadors de forma física i calcular aquests valors empíricament. És per aquest motiu que s'ha usat una modelització més senzilla.

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

La realització d'aquest treball no ha tingut gairebé cap impacte ambiental tant en el seu funcionament normal com si s'hagués presentat alguna averia o accident, més enllà de la normal activitat humana. S'ha de tenir en compte la contaminació ambiental que es desprèn per a la creació de l'electricitat que s'ha usat en la realització del treball, que en tot cas ha sigut petita ja que en el projecte no s'ha treballat amb grans potències.

Si algun dels elements que s'ha utilitzat s'espatllés, probablement la majoria del seu contingut es reciclaria i l'impacte seria lleu.

Conclusions

En aquest projecte s'ha realitzat un simulador de supercondensador basat en font programable de dos quadrants. Per aconseguir aquest propòsit s'ha fet una recerca teòrica sobre aquest component per realitzar la seva posterior modelització. S'ha utilitzat una modelització normalitzada i mitjançant diferents elements i programes, aquesta s'ha adequat al simulador. Finalment per tal de comprovar el correcte funcionament del simulador s'ha realitzat un conjunt d'experiments, els quals tots han tingut un resultat favorable.

Durant la realització del projecte s'ha après no solament a comprendre el funcionament del supercondensador, sinó també a entendre el funcionament dels elements i programes que s'han fet servir per a la consecució d'aquest. S'ha après a connectar els elements entre si, a realitzar una correcta comunicació entre els diferents elements i a programar-los.

Un cop acabat el projecte s'aportaran una sèrie de possibles millores en el futur i possibles aplicacions que se li poden donar a aquest.

La principal millora que es pot fer en el projecte és la de realitzar el simulador basant-se en una modelització més precisa. Per a això es necessitaria conèixer altres valors que els fabricants no donen però que sí que hi ha formes de poder-les esbrinar de forma experimental.

Per altra banda, sempre es pot millorar la programació per tal de fer el simulador més eficient i adequat a la realitat.

De cara al futur, es poden realitzar una sèrie d'experiments amb el simulador per a veure el potencial que tenen els supercondensadors. Aquest no era l'objectiu d'aquest projecte (l'objectiu del projecte era aconseguir un simulador funcional i la posada en marxa dels equips del laboratori), però aquesta idea es pot usar basant-nos en els usos principals que se'ls donen als supercondensadors. Es poden fer experiments per veure com es poden usar en el cotxe elèctric, o com a suport energètic (per exemple, estabilització de tensió en plaques fotovoltaïques) o com a sistemes de transferència de potència, entre d'altres.

Finalment, com a conclusió personal he de dir que la realització d'aquest projecte ha sigut una experiència molt enriquidora. Això és així ja que s'han posat en pràctica els coneixements d'una forma molt propera i treballant amb aspectes propis als objectius de la carrera.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

Pel càlcul del pressupost no s'han tingut en compte ni els materials ni els costos de Software (licència de Labview) per a realitzar el projecte donat que el material és de l'Escola i s'hagués comprat de totes formes independentment de la realització d'aquest projecte o d'un altre de caire similar i, a més, les llicències dels programes són gratuïtes per les universitats. Tampoc s'han tingut en compte materials com ara els cables o l'ordinador que són ítems que ja es trobaven a disposició abans de realitzar el projecte.

Llavors, tenim que el pressupost es compon solament del cost de mà d'obra. Aquest el podem veure en la taula següent:

Concepte	Hores	Preu (€/h)	Subtotal
Mà d'obra: enginyer junior	300	20	6000€
		TOTAL	6000€

Taula 1. Pressupost del projecte.

Bibliografia

- [1] Sunvault Energy (2015). Sunvault Energy and Edison Power Company Create Massive 10,000 Farad Graphene Supercapacitor.
Recuperat de: <https://www.sunvaultenergy.com/sunvault-energy-and-edison-power-company-create-massive-10000-farad-graphene-supercapacitor/>
- [2] Ho, J.; Jow, R.; Boggs, S. "Historical Introduction to Capacitor Technology". IEEE Elect. Insul. Mag. IEEE. 2010
- [3] J. G. Schindall, "The Change of the Ultra-Capacitors", IEEE Spectrum. 2007
- [4] Conway, Brian Evans (1999). "Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications". Berlin: Springer. ISBN 978-1-4757-3058-6.
- [5] David A. Evans (Evans Company): "High Energy Density Electrolytic-Electrochemical Hybrid Capacitor". 1994.
- [6] Naoi, K.; Simon, P. "New Materials and New Configurations for Advanced Electrochemical Capacitors". 2008
- [7] Grahame, David C. "The Electrical Double Layer and the Theory of Electrocapillarity". 1947.
- [8] Srinivasan, S. "Electrode/Electrolyte Interfaces: Structure and Kinetics of Charge Transfer". 2006.
- [9] Halper, Marin S.; Ellenbogen, James C. "Supercapacitors: A Brief Overview". 2006.
- [10] Conway, Brian Evans. "Electrochemical capacitors: Their Nature, Function, and Applications". 2004.
- [11] Frackowiak, Elzbieta; Jurewicz, K.; Delpoux, K.; Béguin, Francois. "Nanotubular Materials For Supercapacitors". 2001.

- [12] Frackowiak, Elzbieta; Béguin, Francois. "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors". *Carbon*. Pergamon, pp 937–950. 2001.
- [13] Pandolfo, A.G.; Hollenkamp, A.F. "Carbon properties and their role in supercapacitors". *J. Power Sources*. pp 11–27. 2006.
- [14] Halper, Marin S.; Ellenbogen, James C. "Supercapacitors: A Brief Overview" (PDF). *MITRE Nanosystems Group*. 2006.
- [15] Chan Kim, Yeong-Og Choi, Wan-Jin Lee, Kap-Seung Yang, "Supercapacitor performances of activated carbon fiber webs prepared by electrospinning of PMDA-ODA poly (amic acid) solutions", *Electrochimica Acta*, vol. 50, pp 883-887. 2004.
- [16] LaClair, M. "Replacing energy storage with carbon aerogel supercapacitors". *Power Electronics*. Penton. 2003.
- [17] Arepalli, S.; H. Fireman; C. Huffman; P. Moloney; P. Nikolaev; L. Yo13well; C.D. Higgins; K. Kim; P.A. Kohl; S.P. Turano; W.J. Ready. "Carbon-Nanotube-Based Electrochemical Double-Layer Capacitor Technologies for Spaceflight Applications"(PDF). *JOM*, vol. 57, pp 24–31. 2005.
- [18] El-Kady, M.F.; Strong, V.; Dubin, S.; Kaner, R.B. "Laser scribing of high-performance and flexible graphene-based electrochemical capacitors". *Science*, vol. 355, pp 1326–1330. 2012.
- [19] Zhu, Y.W., Murali, S., Stoller, M.D. "Carbon-based supercapacitors produced by activation of Graphene". *Science*, vol. 332, pp 1537–1541. 2011.
- [20] Yu Gao, Volker Presser, Lifeng Zhang, Jun J. Niu, John K. McDonough, Carlos R. Pérez, Haibo Lin, Hao Fang, Yury Gogotsi, "High power supercapacitor electrodes based on flexible TiC-CDC nano-felts. Vol. 201, pp 368-375. 2012.
- [21] Lee, J.W., Ahn, T., Kim, J.H. "Nanosheets based mesoporous NiO microspherical structures via facile and templatefree method for high perform". 2011

- [22] Kim, B.K., Chabot, V., and Yu, A. “Carbon nanomaterials supported Ni(OH)₂/NiO hybrid flower structure for supercapacitor”. *Electrochimica Acta*, vol. 109, pp 370–380. 2013.
- [23] Jayalakshmi, M.; Balasubramanian, K. "Simple Capacitors to Supercapacitors - An Overview" (PDF). *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 3, pp 1196–1217. 2003
- [24] N.L. Wu, S.L. Kuo, M.H. Lee. “Preparation and optimization of RuO₂-impregnated SnO₂ xerogel supercapacitor. *Journal of Power Sources*”. *Journal of Power Sources*, vol. 104, pp 62-65. 2002.
- [25] Guoping Wang, Lei Zhang and Jiujuun Zhang. “A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors”. *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, pp 797-828. 2012
- [26] Yu.M. Volkovich, A.A. Mikhailin, D.A. Bograchev, V.E. Sosenkin and V.S. Bagotsky. “Studies of Supercapacitor Carbon Electrodes with High Pseudocapacitance”, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Dr. Ujjal Kumar Sur (Ed.), ISBN 978-953-307-830-4.
- [27] Jun Yan, Qian Wang, Tong Wei, and Zhuangjun Fan. “Recent Advances in Design and Fabrication of Electrochemical Supercapacitors with High Energy Densities” *Adv. Energy Mater.* 2014.
- [28] C. Lin, J. A. Ritter and B. N. Popov, J., “Development of Carbon-Metal Oxide Supercapacitors from Sol-Gel Derived CarbonRuthenium Xerogels”. *Journal of the Electrochemical Societ*, vol. 146, pp 3155. 1999.
- [29] M Min, K Machida, JH Jang, K Naoi., “Hydrous RuO₂/carbon black nanocomposites with 3D porous structure by novel incipient wetness method for supercapacitors”. *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 153, pp 334-338. 2006.
- [30] J.W. Long, K.E. Swider, C.I. Merzbacher, D.R. Rolison. (1999). “Voltammetric characterization of ruthenium oxide-based aerogels and other RuO₂ solids: The nature of capacitance for energy storage by supercapacitors”. *Langmuir*, vol, 15; 780-785. 1999.

- [31] H Zhang, G Cao, Z Wang, Y Yang, Z Shi, Z Gu. "Tube-covering-tube nanostructured polyaniline/carbon nanotube array composite electrode with high capacitance and superior rate performance as well as good cycling stability". *Electrochemistry Communications*, vol. 10, pp 1056-1059. 2008.
- [32] Yu. M. Volkovich, A.A. Mikhailin, D.A. Bograchev, V.E. Sosenkin, V.S. Bagotsky "Studies of Supercapacitor Carbon Electrodes with High Pseudocapacitance". *Recent Trend in Electrochemical Science and Technology*, pp 159-181. 2012.
- [33] K. Naoi, W. Naoi, Sh. Aoyagi, J. Miyamoto, T. Kamino, New Generation "Nanohybrid Supercapacitor", American Chemical Society, Chem. Res., Article ASAP. 2012.
- [34] P. Simon, A. Burke. "Nanostructured Carbons: Double-Layer Capacitance and More", the *Electrochemical Society Interface*, pp 38-43. 2008.
- [35] F. Beguin, V. Presser, A. Balducci, E. Frackowiak. "Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors", *Advanced Materials*, vol. 26, pp 2219-2251. 2014.
- [36] H. Y. Lee, J.B. Goodenough. "Supercapacitor behavior with KCl Electrolyte", *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 144, pp 220-223. 1999.
- [37] D. Jiang, Z. Jin, D. Henderson, J. Wu, "Solvent Effect on the Pore-Size Dependence of an Organic Electrolyte Supercapacitor", the *Journal of Physical Chemistry Letters*, American Chemical Society. Vol. 3, pp 1727-1731. 2012.
- [38] A. Schneuwly, R. Gally, "Properties and applications of supercapacitors: from the state-of-the-art to future trends". *Proceeding PCIM*. 2010.
- [39] *Electroquímica, ciencia y tecnología*, 2016. "Conversión y almacenamiento electroquímico de energía". Madrid, España.
Recuperat de: <http://docplayer.es/16995236-Electroquimica-ciencia-y-tecnologia.html>
- [40] Panasonic Electronic Devices CO., LTD.: "Gold capacitors Characteristics data In: Technical Guide of Electric Double Layer Capacitors", Edition 7.4. 2011.

- [41] Dirk Linzen, Stephan Buller, Eckhard Karden, Rik. W. De Doncker, "Analysis and Evaluation of Charge Balancing Circuits on Performance Reliability and Lifetime of Supercapacitor Systems", *IEEE Industry Applications Society*, vol. 3, pp 1589-1595. 2003.
- [42] A. Cortés. "Sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores". Universidad de Alcalá. Madrid.
- [43] A. Hernández. "Aplicación de supercondensadores para la hibridación de almacenamiento de energía". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- [44] E. Cucurella. "Caracterización de los acumuladores con condensadores en comparación con los acumuladores electroquímicos". Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona
- [45] L. Iglesias. "Fabricación de supercondensadores electrostáticos sobre materiales nanoestructurados para almacenamiento de energía eléctrica". Universidad de Oviedo. Oviedo.

Annex A

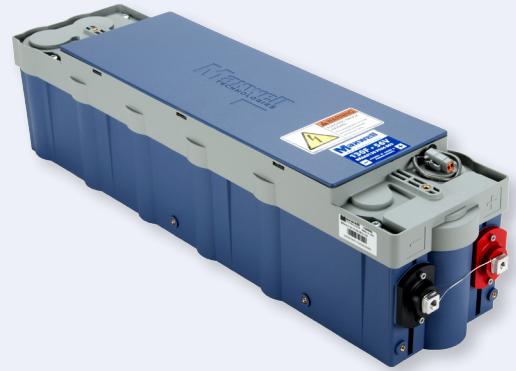
Datasheet supercondensador Maxwell 56V module.

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 14 year DC life
- 56V DC working voltage
- Resistive cell balancing
- Overvoltage outputs
- High power density
- 4U, half-rack package
- UL registered

TYPICAL APPLICATIONS

- UPS systems

**PRODUCT SPECIFICATIONS****ELECTRICAL****BMOD0130 P056 B03**

Rated Capacitance ¹	130 F
Minimum Capacitance, initial ¹	130 F
Maximum Capacitance, initial ¹	156 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	8.1 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	56 V
Absolute Maximum Voltage ²	62 V
Absolute Maximum Current	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	120 mA
Maximum Series Voltage	750 V
Capacitance of Individual Cells ⁹	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell ⁹	3.0 Wh
Number of Cells	23

TEMPERATURE

Operating Temperature (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	40°C
Storage Temperature (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL

BMOD0130 P056 B03

Mass, typical	18 kg
Power Terminals	M8/M10
Recommended Torque - Terminal	20/30 Nm
Vibration Specification	Telcordia GR-63-CORE Zone 4
Shock Specification	N/A
Environmental Protection	IP30
Cooling	Natural Convection

MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT

Internal Temperature Sensor	N/A
Temperature Interface	N/A
Cell Voltage Monitoring	Overvoltage Alarm
Connector	Deutsch DTM
Cell Voltage Management	Passive

POWER & ENERGY

Usable Specific Power, P_d^4	2,600 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max}^5	5,400 W/kg
Specific Energy, E_{max}^6	3.1 Wh/kg
Stored Energy ⁷	57 Wh

SAFETY

Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	6,900 A
Certifications	RoHS, UL810a (750 V)
High-Pot Capability ¹⁰	4,000 V DC

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS

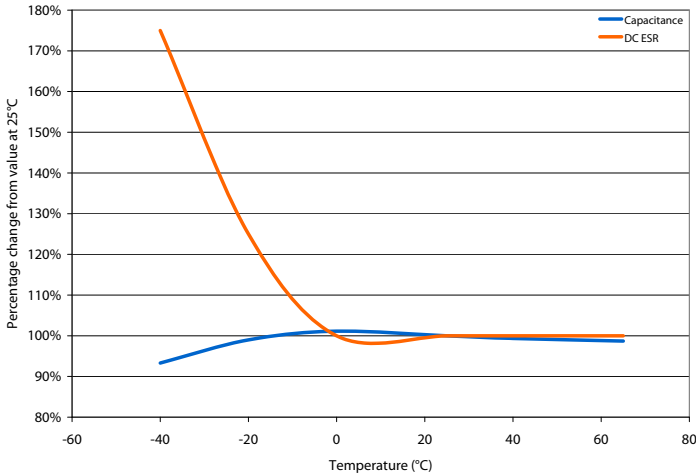
BMOD0130 P056 B03

Thermal Resistance (R_{ca} , All Cell Cases to Ambient), typical ⁸	0.50°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical	16,000 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) ⁸	61 A, RMS
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$) ⁸	99 A, RMS

LIFE

DC Life at High Temperature ¹ (held continuously at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	8 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)	14 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE



NOTES

1. Capacitance and ESR_{DC} measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.

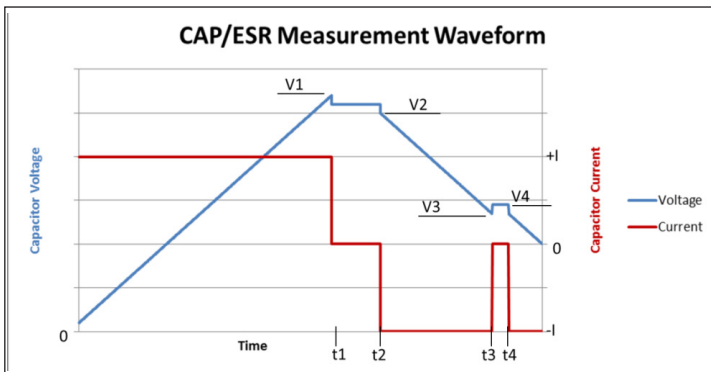
4. Per IEC 62391-2, $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times mass}$

5. $P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times mass}$

6. $E_{max} = \frac{1/2 CV^2}{3,600 \times mass}$

7. $E_{stored} = \frac{1/2 CV^2}{3,600}$

8. $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{ca}$
9. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
10. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.



$V1 = V_{rated}$ $t2 - t1 = 15 \text{ seconds}$ $Capacitance = I \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$
 $V3 = 0.5 \times V_{rated}$ $t4 - t3 = 5 \text{ seconds}$ $ESR = (V4 - V3) / I$

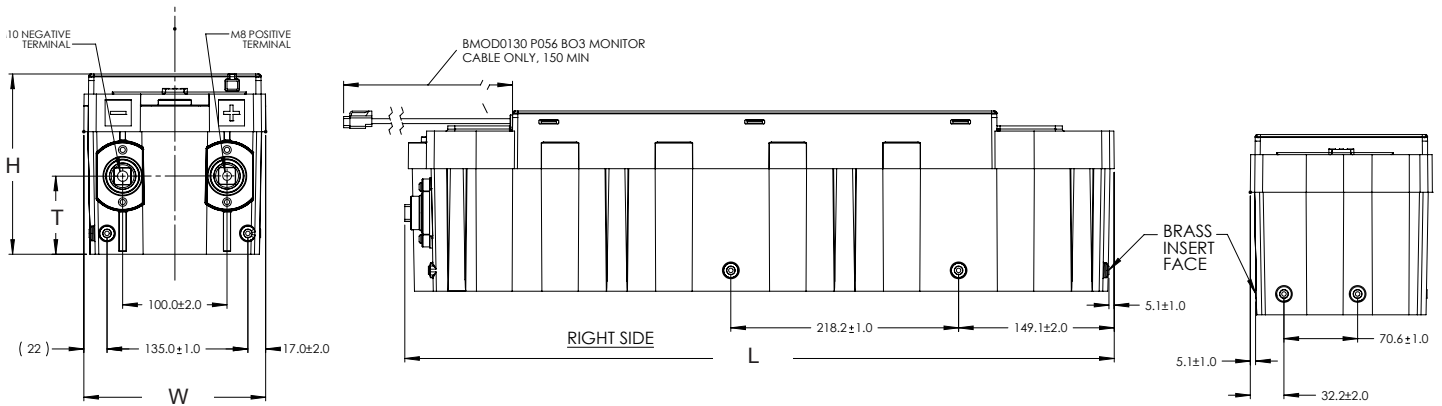
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Please refer to the user manual for installation recommendations.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

BMOD0130 P056 B03



Part Description	Dimensions (mm)				Package Quantity
	L (max)	W (max)	H (max)	T (±2mm)	
BMOD0130 P056 B03	683	177	175	74.9	1

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice.

Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6643119, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7791860, 7791861, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.



Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
 3888 Calle Fortunada
 San Diego, CA 92123
 USA
 Tel: +1 858 503 3300
 Fax: +1 858 503 3301



Maxwell Technologies SA
 Route de Montena 65
 CH-1728 Rossens
 Switzerland
 Tel: +41 (0)26 411 85 00
 Fax: +41 (0)26 411 85 05



Maxwell Technologies, GmbH
 Leopoldstrasse 244
 80807 München
 Germany
 Tel: +49 (0)89 / 4161403 0
 Fax: +49 (0)89 / 4161403 99



Maxwell Technologies Shanghai Trading Co. Ltd.
 Unit A2,C 12th Floor
 Huarun Times Square
 500 Zhangyang Road,
 Pudong New Area
 Shanghai 200122,
 P.R. China
 Phone: +86 21 3852 4000
 Fax: +86 21 3852 4099



Maxwell Technologies Korea, Ltd.
 Room 1524, D-Cube City
 Office Tower, 15F #662
 Gyeongin-Ro, Guro-Gu,
 Seoul, 152-706
 South Korea
 Phone: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, C CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, imitated or used, in whole or in part, without the prior written permission from Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2013 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.

Annex B

Programació del Regatron amb LabVIEW.



TopCon Series

TC.P + TC.G

LabVIEW API Access

Regatron AG
Kirchstrasse 11
CH-9400 Rorschach
Tel +41 71 846 67 44
Fax +41 71 846 67 77
www.regatron.com
tc.support@regatron.ch

Getting Started

Version V 1.02

© 2010- 2018 Regatron AG

This document is protected by copyright.

All rights, including translation, re-printing and duplication of this manual or parts of it, reserved. No part of this document is allowed to be reproduced or processed using electronic systems, copied or distributed in any form (by photocopying, microfilming or any other process), also not for educational purposes, without the written approval of Regatron AG.

This information in this documentation corresponds to the development situation at the time of going to print and is therefore not of a binding nature. Regatron AG reserves the right to make changes at any time for the purpose of technical progress or product improvement, without stating the reasons. In general we refer to the applicable issue of our “Terms of delivery”.

LabVIEW is registered trademark of National Instruments, USA. Windows is registered trademark of Microsoft Inc., USA.

Overview of versions		
Operating instructions / programming handbook	Version	V 1.02
	TC API	1.0.1.387

All information is subject to technical changes without prior notice.

Content

Content	3
1. Overview	4
1.1. Content	4
1.2. Precondition / Dependencies.....	4
2. LabVIEW Access	5
2.1. Files	5
2.2. General Recommendations	5
2.2.1. Basic Init VI	5
2.2.2. Configuration (..\Settings)	5
2.2.3. References (..\Power).....	6
2.2.4. Output Values (..\Power).....	6
2.2.5. System Info (..\Info).....	6
2.2.6. Utility (..\Info).....	7
2.2.7. Messages (..\Messages).....	7
2.2.8. Func Generator (..\F-Generator)	7
2.2.9. Low Level TC.Ilb (..\Info)	7
2.3. Examples (..\Example).....	8
2.4. Application builder (DLL Files).....	8
3. Change log	9

1. Overview

The TopCon LabVIEW API can be used to access the TC.P and TC.G to perform a small set of operations.

It cannot substitute the TopControl PC Software, but offers some methods to automate certain operations.

The main configuration and error analysis can only be done with the TopControl software.

1.1. Content

This document provides a guideline how to access the TopCon LabVIEW VI's.

1.2. Precondition / Dependencies

To be able to use the TopCon LabVIEW API the TopControl software must not be installed on the system.

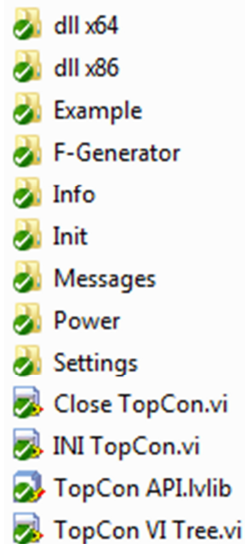
For more Information read the Software Manual witch you can found in the TopControl software menu -> Help.

2. LabVIEW Access

There is a LabVIEW VI library to access the TC.

Two Examples are delivered and can help to get your first LabVIEW program running.

2.1. Files

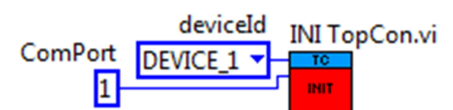


2.2. General Recommendations

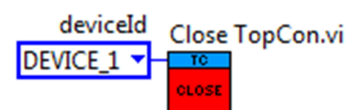
To access the API from LabVIEW, there are some points to mention.

2.2.1. Basic Init VI

Init TopCon: Open a connection to TC with a COM Port or Virtual COM Port (max. 7 devices)
Min. Firmware Version: 4.20.97 (Check in the VI)



Close TopCon: Disconnect the device



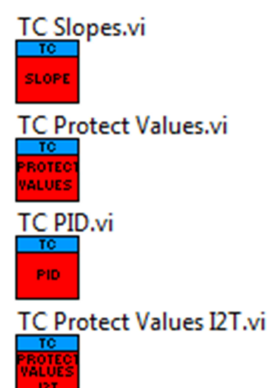
2.2.2. Configuration (..\Settings)

TC Slopes: Slopes Ramp Setting (Read/Write)

TC Protect Values: Protect Setting (Read/Write)

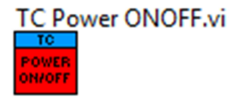
TC PID: PID Controller Setting (Read/Write)

TC Protect Values I2T: I2T Protect Setting (Read/Write)

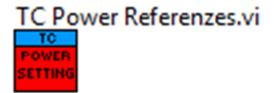


2.2.3. References (..\Power)

TC Power ONOFF: Voltage ON/OFF Setting (Read/Write)



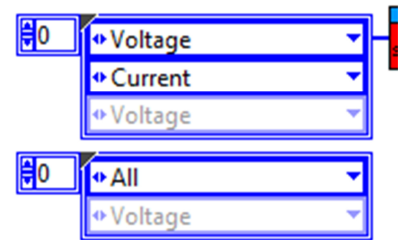
TC Power References: Preset and Limit Setting (Read/Write)



Datasource:

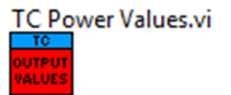
Read or Write Power Setting with Datasource

It is not necessary to write all values.



2.2.4. Output Values (..\Power)

TC Power Values: Output Values (Read)

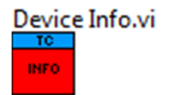


TC Sense Value: Actual Sense Value (Read)

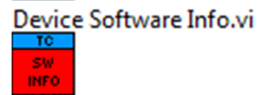


2.2.5. System Info (..\Info)

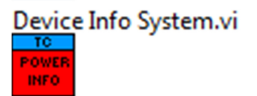
Device Info: Modul Typ, Serial Nr., Modul ID, GSS



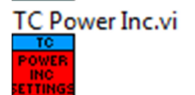
Device Software Info: Firmware Versions, SW Options



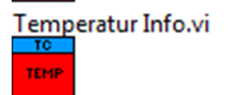
Device Info System: Nominal Modul and Multi Modul Values



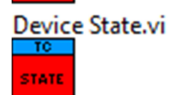
TC Power Inc: Typical Value Increment



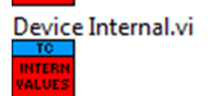
Temperatur Info: IGBT, Boster, PCB,..



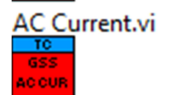
Device State: State of the TC (Warning, Error, Run)



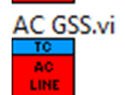
Device Internal: Internal DC and Primary Current



AC Current: AC Grid Current Values (L1,L2,L3)

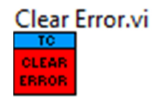


AC GSS: AC Grid Voltage Values (L1,L2,L3)



2.2.6. Utility (..\Info)

Clear Error: Clear TC Modul or System



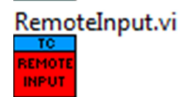
Store Settings: Store Settings to Flash



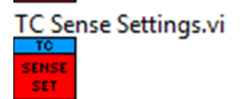
Device Hour Info: Operation Hours and Voltage ON Hours



Remote Input: Remote Settings (Read/Write)



TC Sense Settings: Sense Settings

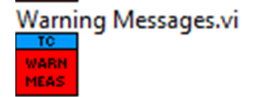


2.2.7. Messages (..\Messages)

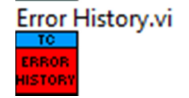
Error Messages:



Warning Messages:

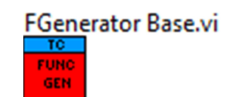


Error History:

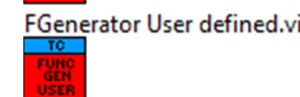


2.2.8. Func Generator (..\F-Generator)

F Generator Base: Set Basic Values for the Frequency



FGenerator User defined: Point Frequency Values



2.2.9. Low Level TC.IIb (..\Info)

Get TopConRef & GetFunktionDeviceInfo: Reference for own VI



2.3. Examples (..\Example)

Two LabVIEW test Examples are provided to show how to access the TC API dll's.



The examples are for LabVIEW 2015 and LabVIEW 2009.

2.4. Application builder (DLL Files)















Labview copies only the directly called DLL into the APP directory.

But you need all DLL!

Wrong:

Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
 TcioWrapper.dll	30.01.2018 13:49	DLL-Datei	502 KB
 TopConAPI.dll	19.12.2017 10:07	DLL-Datei	2'176 KB

Correct:

Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
 BatModLab.dll	18.07.2017 16:06	DLL-Datei	1'454 KB
 ConfigLab.dll	18.07.2017 16:06	DLL-Datei	1'408 KB
 log4net.dll	19.12.2017 09:58	DLL-Datei	244 KB
 tcio.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_2.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_3.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_4.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_5.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_6.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 tcio_7.dll	18.07.2017 16:05	DLL-Datei	427 KB
 TcioWrapper.dll	30.01.2018 13:49	DLL-Datei	502 KB
 TopConAPI.dll	19.12.2017 10:07	DLL-Datei	2'176 KB
 UserMsgUs.dll	18.07.2017 16:06	DLL-Datei	471 KB
 WibuCm32.dll	18.07.2017 16:06	DLL-Datei	751 KB

3. Change log

This change log contains a list of changes in the previous versions of the documentation

Version	Date	Changes in documentation
1.00	2017-02-23	Initial documentation
1.01	2017-09-14	Update documentation (.net 2.0 -> 4.7)
1.02	2017-12-21	Update API (1.0.0.360 -> 1.0.1.387)



Address: Kirchstrasse 11
CH-9400 Rorschach

WWW: www.regatron.com

Email: tc.support@regatron.ch

Tel: +41 71 846 67 44
Fax: +41 71 846 67 77