



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial

MODELADO Y ENSAYO DE BATERIAS: VALIDACION DE SIMULACIONES DE CARGA Y DESCARGA

Titulación: Ingeniería Técnica Industrial
Intensificación: Electricidad
Alumno: Martín Sueldo
Directores: Juan Álvaro fuentes Moreno
Juan Martínez Tudela

Cartagena, 03 de Noviembre de 2009





ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
1 INTRODUCCION	5
1.1 OBJETIVO	6
1.2 BATERÍA	6
1.3 CARGADOR	7
1.4 CARGA ELECTRÓNICA	10
A) DESCRIPCIÓN DE LA CARGA ELECTRÓNICA	10
B) PROGRAMACIÓN DE LA CARGA ELECTRÓNICA	14
1.5 DISPOSITIVO DE DESCONEXIÓN DE LA BATERÍA	17
A) DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA.	17
B) REGULACIÓN DEL SISTEMA DE DESCONEXIÓN AUTOMÁTICA.	20
2 MODELOS	23
2.1 MODELO DE 3 ^{ER} ORDEN	25
2.2 MODELO DE 4 ^{TO} ORDEN	34
3 ENSAYOS-OBTENCION DE PARAMETROS	40
3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	40
3.2 ENSAYOS DE DESCARGA	46
A) TIPOS DE DESCARGA Y NOMENCLATURA.....	46
B) ENSAYOS DE DESCARGA REALIZADOS.....	47
C) TABLA RESUMEN - DATOS MÁS IMPORTANTES DE LOS ENSAYOS.	68
3.3 ENSAYOS DE CARGA	69
A) INTRODUCCIÓN A LA CARGA DE LA BATERÍA	69
B) ENSAYO DE CARGA ESTUDIADO.	69
C) TABLA RESUMEN - DATOS MÁS IMPORTANTES DEL ENSAYO DE CARGA.....	73
3.4 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE LA BATERÍA	74
4 SIMULACIÓN	76
4.1 SIMULACIONES DE 3 ^{ER} ORDEN	76
A) INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EN SIMULINK	76
B) SIMULACIONES DE CARGA Y DESCARGAS REALIZADAS.....	78
4.2 SIMULACIONES DE 4 ^{TO} ORDEN	103
A) INTRODUCCIÓN AL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO EN SIMULINK	103
B) SIMULACIONES DE CARGA Y DESCARGAS REALIZADAS.....	105
5 COMPARACION	121
5.1 COMPARACIÓN - MODELO DE 3ER ORDEN.....	121
5.2 COMPARACIÓN - MODELO DE 4TO ORDEN.....	138
6 CONCLUSIONES	152
6.1 CONCLUSIONES RELATIVAS AL MODELO DE 3ER ORDEN.....	152
6.2 CONCLUSIONES RELATIVAS AL MODELO DE 4TO ORDEN.....	154



6.3	POSIBLES APLICACIONES PRÁCTICAS DE LOS MODELOS	156
6.4	CONCLUSIONES FINALES	157
7	BIBLIOGRAFIA	158
8	ANEXOS	159
8.1	ANEXO I – CHARGE AND DISCHARGE FOURTH ORDER DYNAMIC MODEL OF THE LEAD-ACID BATTERY	159
8.2	ANEXO II – NEW DYNAMICAL MODELS OF LEAD-ACID BATTERIES	159
8.3	ANEXO III – DYNAMICAL MODELS OF LEAD-ACID BATTERIES. IMPLEMENTATION ISSUES	159
8.4	ANEXO IV – INSTRUCCIONES DE USO Y CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA	159



AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto refleja el trabajo personal de estos últimos meses de mi vida, en donde he aprendido el verdadero significado de esta carrera.

Por ello me gustaría mostrar mis más sinceros agradecimientos a mis directores del proyecto, Juan Álvaro Fuentes Moreno y Juan Martínez Tudela, por la confianza depositada en mí para poder llevar a cabo este proyecto, por sus consejos y sus aclaraciones en las dudas que me fueron surgiendo.

También agradecer a todo el personal del departamento de electricidad por la confianza y la paciencia que me han tenido durante estos meses.

Por supuesto agradecer el apoyo de mi familia, sin su apoyo no estaría donde estoy. En especial a mi madre por sufrir tanto como yo en terminar esta carrera.

Por último me gustaría agradecer el apoyo incondicional de todos y cada uno de mis amigos, por todos los grandes momentos que hemos pasado juntos estos últimos años y que me han dado fuerzas para conseguir esta meta.



1 INTRODUCCION

Siempre ha sido de gran interés en el mundo de la ingeniería comprender y poder simular cómo se comporta una batería electroquímica, ya sea de plomo-ácido, de Níquel Cadmio o de otro tipo. Las baterías tienen una gran importancia en los sistemas eléctricos de potencia, ya que permiten almacenar pequeñas cantidades de energía y poder disponer de ella de una manera inmediata, las principales aplicaciones son:

- Aplicaciones en Suministros de Potencia Ininterrumpidos (UPS - Uninterruptable Power Supplies), como por ejemplo el sistema de control de un central nuclear.
- Proveer energía eléctrica a sitios aislados donde no llega la Red Eléctrica
- Plantas de almacenamiento de energía en baterías (BESP - Battery Energy Storage Plants).
- Como fuente de energía de vehículos eléctricos, incluidos los submarinos.

A pesar de que la batería tiene muchos campos de aplicación en la ingeniería eléctrica, aún hoy en día se aprecia una escases de modelos de baterías que sean de fácil comprensión para alguien de la rama de la ingeniería eléctrica. Es debido a esto que surge la necesidad de este proyecto, ya que el Grupo de investigación IEER (Ingeniería Eléctrica Energías Renovables) tenía la necesidad de disponer de un modelo eléctrico del comportamiento de la batería de fácil aplicación.

El comportamiento de una batería es algo que es muy complejo de describir, ya que intervienen fenómenos eléctricos, químicos y térmicos, por lo tanto siempre ha sido algo difícil de modelar. Hoy en día existen muchos modelos de baterías, algunos de ellos basados en los fenómenos químicos que en ellas se producen, pero estos modelos son muy complejos haciendo difícil su utilización fuera del laboratorio de un modo práctico.

Por ello en este proyecto hemos decidido basarnos en un modelo que representase a la batería como una red eléctrica, de manera que el funcionamiento del modelo sea de fácil asimilación para un ingeniero eléctrico.

Con este modelo se puede simular el comportamiento de una batería en diferentes condiciones evitando los costosos test de laboratorio.



1.1 Objetivo

El Objetivo Principal de este proyecto es la implementación y validación en el laboratorio de modelos matemáticos que permitan modelar el comportamiento de baterías, para ello partimos de unos ya desarrollados por el ingeniero eléctrico Massimo Ceraolo de la Universidad de Pisa (Italia), en colaboración con otros profesores.

Para ello se han simulado los modelos propuestos en Matlab con la herramienta simulink, pensada especialmente para simular procesos dinámicos. Una vez conseguido el modelo lo hemos ajustado a nuestra batería para así poder comprobar que el modelo se ajusta a las cargas y descargas realizadas a nuestra batería.

Para realizar dichos ensayos se ha contado con una fuente programable AGILENT N3300A, que nos permite realizar descargas a intensidad constante. También disponemos de un cargador Victron Energy modelo CENTAUR 12V/30A. Además disponemos de diferentes instrumentos como polímetros, pinzas amperimétricas, sondas voltimétricas, una fuente de tensión regulable, etc.

1.2 Batería

Debido a que este proyecto de fin de carrera se ha realizado pensando en las posibles aplicaciones que podría tener en el sector de las energías renovables, especialmente en energía fotovoltaica. Se ha optado por una batería de las utilizadas en este tipo de instalaciones.

Concretamente se trata de una batería del fabricante TAB, cuyas siglas significan Técnicas Aplicadas en Baterías. Los ensayos se han realizado con una batería del modelo **12V 3 OPzS 150**.



Batería utilizada para los ensayos



Se pueden consultar las instrucciones de uso y los datos técnicos de la batería en el ANEXO IV de este proyecto.

Hay que mencionar que las características técnicas están definidas a una temperatura nominal de 20°C, debido a esto al intentar reproducir una descarga C1 es decir según el fabricante una descarga a 87 amperios durante una hora, la batería no es capaz de darnos esos 87 Ah, debido a que los ensayos se han realizado a una temperatura ambiente de 26°C, diferente de la temperatura nominal.

1.3 Cargador

El cargador utilizado para realizar las recargas de la batería es un modelo del Fabricante Victron Energy, concretamente el modelo CENTAUR 12V30A. Este cargador no permite cargar la batería a intensidad constante.



Cargador Centaur 12V 30A

De acuerdo con el fabricante el cable que une el cargador con la batería debe de ser de 16 mm² de sección, y el cable que conecta el cargador a la red eléctrica debe tener una sección de entre 2,5 mm² y 4 mm². A continuación podemos ver en la tabla del manual del cargador las secciones anteriormente descritas:



Required tools and cables

- M6 Socket driver.
- Crosshead screwdriver no. 2 Phillips.
- Battery cables: minimum cable cross-section

Model	Length 0 - 6 m
12/20 24/16	10 mm ² AWG 7
12/30 12/40 24/30 24/40	16 mm ² AWG 5
12/50 12/60 24/60	25 mm ² AWG 3
12/80 12/100 24/80 24/100	35 mm ² AWG 2
12/200	50 mm ² AWG 0

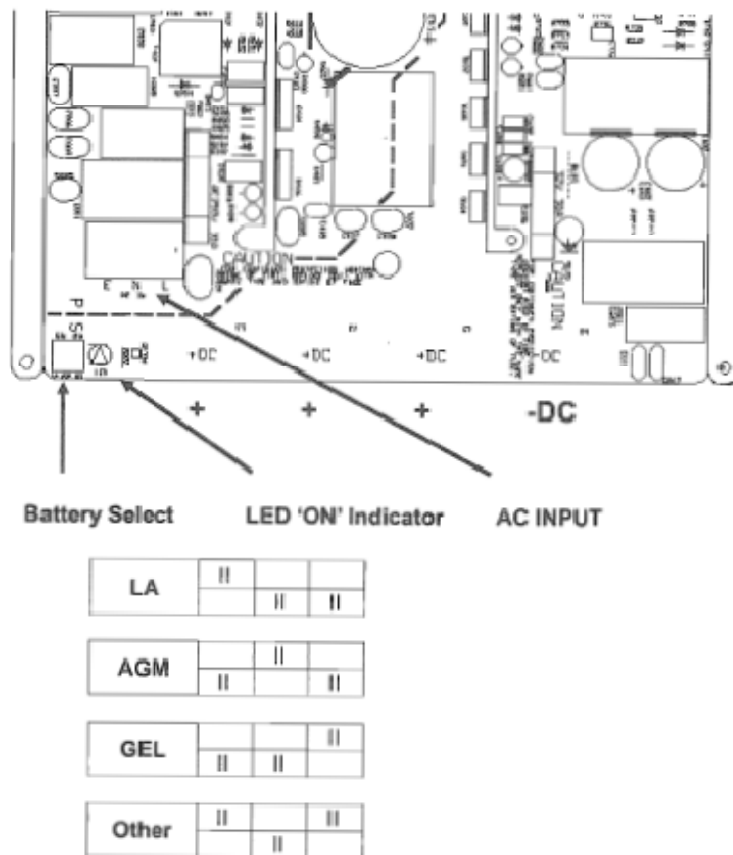


Connection sequence

- Disconnect mains.
- Disconnect battery cables from the battery.
- Open front cover.
- Connect battery cables to the charger. Note that there's only one "minus"- Use a fuse according the size of the battery charger.
- Connect battery cables to the battery.
- Connect the AC-in by means of a 3-core cable of 2.5 – 4 mm² flexible core to the AC-in terminal block. Note that a real PE-connection is strictly necessary.
- Close the front panel.

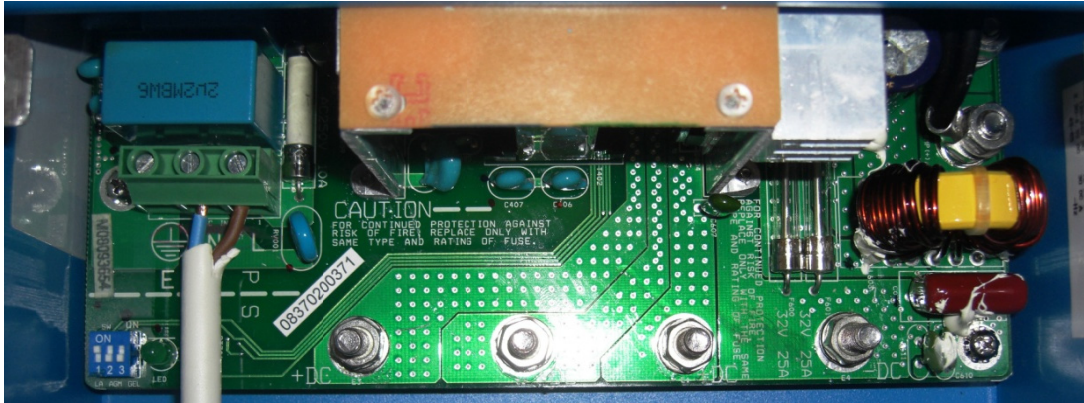
	Charge voltage at appr. 10% of the nominal current			
	Absorption		Float	
	12V	24V	12V	24V
GEL	14.2	28.4	13.5	27.0
AGM	14.35	28.7	13.3	26.6
LA	14.5	29.0	13.5	27.0
Other	14.85	29.7	13.7	27.4

El cargador está provisto de unos jumpers que permiten configurarlo para un determinado tipo de batería, en nuestro caso se trata de una batería de plomo-acido, cuyas siglas en ingles son LA (lead acid), por lo tanto tomaremos la configuración que se ve en la siguiente figura extraída del manual del cargador:





Podemos apreciar en la siguiente imagen las bornes de conexión de C.C., el que está más hacia la derecha es el borne negativo, las otras 3 son las positivas. También se aprecia la configuración de los jumpers (abajo – izquierda), así como la conexión de C.A.



A continuación, se pueden ver las especificaciones técnicas del cargador extraídas del manual del fabricante:

Centaur Charger	12/20	12/30	12/40	12/60	12/80	12/100	12/160	12/200	
		24/16		24/30	24/40	24/60	24/80	24/100	
Common characteristics	Input voltage: 90 – 265 V			Input frequency: 45 – 65 Hz					Power factor: 1
Charge voltage 'absorption' (V DC)	14,3 / 28,5 (1)								
Charge voltage 'float' (V DC)	13,5 / 27,0 (1)								
Output banks	3								
Charge current (A) (2)	20	30/ 16	40	60/ 30	80/ 40	100/ 60	160/ 80	200/ 100	
Total output ammeter	Yes								
Charge characteristic	iUoU (Three stage charging)								
Recommended battery capacity (Ah)	80 – 200	120- 300	160- 400	240- 600	320- 800	400- 1000	640- 1600	800- 2000	
Temperature sensor	Internal, - 2mV / °C (- 1mV / °F) per cell								
Forced cooling	Yes, temperature and current controlled fan								
Protection	Output short circuit, over temperature								
Operating temp. range	- 20 to 60°C (0 - 140°F)								
Ignition protected	Yes								
Humidity (non condensing)	max 95%								
ENCLOSURE									
Material & Colour	aluminium (blue RAL 5012)								
Battery-connection	M6 studs	M6 studs	M8 studs	M8 studs	M8 studs	M8 studs	M8 studs	M8 studs	
AC-connection	screw-clamp 4 mm ² (AWG 6)								
Protection category	IP 21								
Weight kg (lbs)	3,8 (8,4)	3,8 (8,4)	5 (11)	5 (11)	12 (26)	12 (26)	16 (35)	16 (35)	
Dimensions (height in mm (height in inches))	88x215 (x110) (14,0x8,5 (x4,3))	88x215 (x110) (14,0x8,5 (x4,3))	426x239 (x135 (x5,3))	426x239 (x135 (x5,3))	505x255 (x130 (x5,1))	505x255 (x130 (x5,1))	505x255 (x130 (x5,1))	505x255 (x130 (x5,1))	
STANDARDS									
Safety	EN 60335-2-29, UL 1236								
Emission	EN 55014, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3								
Immunity	EN 55014-2								

1) Standard setting.
Optimum charge/float voltages for Flooded Lead-acid, Gel-Cell or AGM batteries selectable by dip switch.
2) Up to -40 °C (100 °F) ambient.
Output will reduce to approximately 80 % of nominal at 50 °C (120 °F) and 60 % of nominal at 60 °C (140°F).



1.4 Carga electrónica

a) Descripción de la Carga electrónica

Para la realización de los ensayos de este proyecto se ha utilizado una Carga Electrónica Programable (CEP) del Fabricante Agilent, modelo N3300A.



Panel frontal y teclado de programación

Esta carga electrónica se puede configurar con diferentes módulos, hasta un máximo de 6 módulos. En concreto nuestra Carga electrónica está equipada con dos módulos de 150v 60A, que son controlados a través del Canal 1 y del Canal 2.



Fotografía de la parte posterior



En la fotografía anterior podemos apreciar la conexión de los cables de 16 mm² que vienen de la batería, a la izquierda podemos ver una regleta de conexión (verde), esta es donde la carga electrónica da sus variables de salida, en concreto tomamos el valor de la tensión (pin A10) y de la intensidad (pin A11), que tienen en común la masa en el (pin A9), nos dan los valores en una escala de 0 a 10V en función de la escala de corriente y tensión que hayamos programado la fuente.

- A9** Provides the common connection for the current and voltage monitor signals (pins A10 and A11).
- A11 and A10** Used to monitor the modules input current and voltage. A 0V-to-+10V signal at the appropriate pin indicates the zero-to-full scale current or voltage. Pin A11 monitors current and pin A10 monitors voltage.
- +S and -S** Used to connect the remote sense leads to the power source. Pin +S connects the +S signal and pin -S connects the -S signal. Remote sensing can only be used in CV and CR modes, or when using voltage readback.

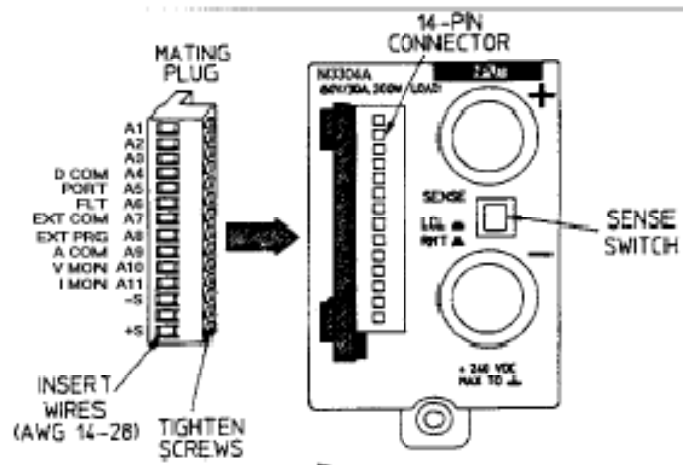
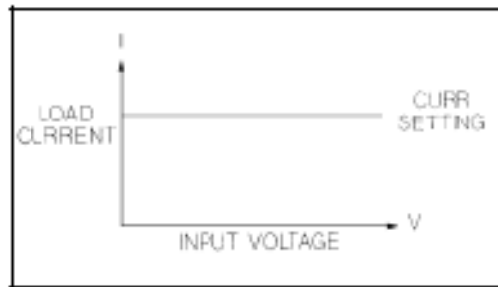


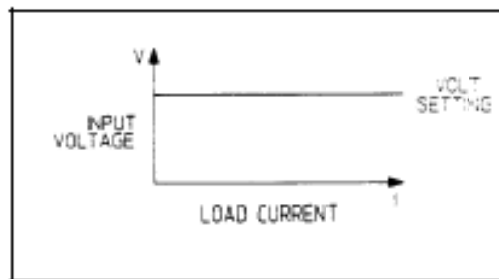
Figure 3-7. Control Connector

Hay que destacar que cada Módulo tiene sus propias protecciones, estas son:

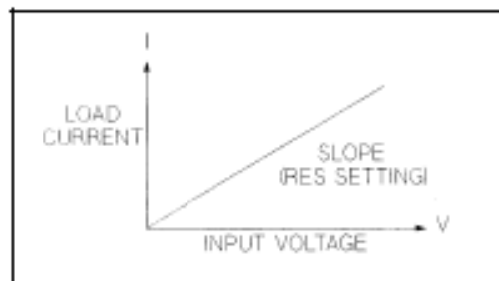
- Sobretensión ($V > 150v$)
 - Sobre corriente ($I > 60A$)
 - Exceso de potencia ($P > 500w$)
 - Exceso de temperatura
 - Tensión inversa
- **La carga electrónica, tiene 3 modos diferentes de funcionamiento:**
 - El modo CC (constant current)** hace que se produzca una descarga a corriente constante, es decir la carga electrónica programable (CEP) realiza un ajuste automático de la resistencia interna de la carga en función de la tensión de la batería en cada instante, de este modo se consigue una descarga a intensidad constante. Este modo de funcionamiento es el que hemos utilizado en este proyecto.



El modo CV (constant voltage) hace que la carga extraiga una intensidad que varía en el tiempo, de forma tal que la tensión se mantenga constante en el tiempo. Este modo no se usa en el presente PFC.



El modo CR (constant resistance), hace que la carga se comporte como una resistencia normal que descargaría la batería. Este modo no se usa en el presente PFC.





• **Especificaciones.**

	N3302A	N3303A	N3304A	N3305A	N3306A	N3307A
Input Ratings						
Current	0 - 30 A	0 - 10 A	0 - 60 A	0 - 60 A	0 - 120 A	0 - 30 A
Voltage	0 - 60 V	0 - 240 V	0 - 60 V	0 - 150V	0 - 60V	0 - 150V
Maximum Power @ 40°C ¹	150 W	250 W	300 W	500 W	600 W	250 W
Input Characteristic						
Specified Current @ Low Voltage Operation						
2.0 V	30 A	10 A	60 A	60 A	120 A	30 A
1.5 V	22.5 A	7.5 A	45 A	45 A	90 A	22.5 A
1.0 V	15 A	5 A	30 A	30 A	60 A	15 A
0.5 V	7.5 A	2.5 A	15 A	15 A	30 A	7.5 A
0 V	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A

¹Maximum continuous power available is derated linearly from 100% of maximum at 40°C, to 75% of maximum at 55°C.

Typical Minimum Operating Voltage @ Full Scale Current

	N3302A	N3303A	N3304A	N3305A	N3306A	N3307A
Table A-1 states that maximum current is available down to 2 volts. Typically, under normal operating conditions, the load can sink the maximum current down to the following voltages:	1.2 V	1.2 V	1.2 V	1.4 V	1.4 V	1.4 V

	N3302A	N3303A	N3304A	N3305A	N3306A	N3307A
Constant Current Mode²						
Low Range/High Range	3A / 30A	1A / 10A	6A / 60A	6A / 60A	12A / 120A	3A / 30A
Regulation	10mA	8mA	10mA	10mA	10mA	10mA
Low Range Accuracy	0.1% + 5mA	0.1% + 4mA	0.1% + 7.5mA	0.1% + 7.5mA	0.1% + 15mA	0.1% + 7.5mA
High Range Accuracy	0.1% + 10mA	0.1% + 7.5mA	0.1% + 15mA	0.1% + 15mA	0.1% + 37.5mA	0.1% + 15mA
Constant Voltage Mode²						
Low Range/High Range	6V / 60V	24V / 240V	6V / 60V	15V / 150V	6V / 60V	15V / 150V
Regulation	5mV	10mV	10mV	10mV	20mV	10mV
Low Range Accuracy	0.1% + 3 mV	0.1% + 10mV	0.1% + 3 mV	0.1% + 10mV	0.1% + 3mV	0.1% + 10mV
High Range Accuracy	0.1% + 8 mV	0.1% + 40mV	0.1% + 8mV	0.1% + 20mV	0.1% + 8mV	0.1% + 20mV
Constant Resistance Mode^{2,3}						
Range 1 (I > 10% of current rating)	0.067-4 Ω	0.2-48 Ω	0.033-2 Ω	0.033-5 Ω	0.017-1 Ω	0.067-10 Ω
Accuracy up to 25% of range	0.4% ± 24mΩ	1% ± 100mΩ	0.4% ± 12mΩ	0.4% ± 24mΩ	0.4% ± 6mΩ	0.75% ± 32mΩ
Accuracy >25% to 50% of range	0.4% ± 24mΩ	2% ± 100mΩ	0.4% ± 12mΩ	0.4% ± 24mΩ	0.4% ± 6mΩ	1.5% ± 32mΩ
Accuracy >50% to 100% of range	0.8% ± 24mΩ	3% ± 100mΩ	0.4% ± 12mΩ	0.8% ± 24mΩ	0.4% ± 6mΩ	2% ± 32mΩ
Range 2 (I > 1% of current rating)	3.6-40 Ω	44-480 Ω	1.8-20 Ω	4.5-50 Ω	0.9-10 Ω	9-100 Ω
Accuracy up to 25% of range	1.5% ± 80mΩ	5% ± 500mΩ	1.5% ± 40mΩ	1.5% ± 80mΩ	1.5% ± 20mΩ	3% ± 120mΩ
Accuracy >25% to 50% of range	2% ± 80mΩ	10% ± 500mΩ	2% ± 40mΩ	2% ± 80mΩ	2% ± 20mΩ	6% ± 120mΩ
Accuracy >50% to 100% of range	3% ± 80mΩ	20% ± 500mΩ	3% ± 40mΩ	3% ± 80mΩ	3% ± 20mΩ	10% ± 120mΩ
Range 3 (I > 0.1% of current rating)	36-400 Ω	440-4800 Ω	18-200 Ω	45-500 Ω	9-100 Ω	90-1000 Ω
Accuracy up to 25% of range	8% ± 240mΩ	-30%/+50%	6% ± 120mΩ	-10%/+25%	6% ± 60mΩ	-20%/+20%
Accuracy >25% to 50% of range	16% ± 240mΩ	-40%/+133%	10% ± 120mΩ	-20%/+50%	10% ± 60mΩ	-30%/+60%
Accuracy >50% to 100% of range	32% ± 240mΩ	-50%/+600%	20% ± 120mΩ	-30%/+150%	20% ± 60mΩ	-33%/+200%
Range 4 (I > 0.01% of current rating)	360-2000 Ω	4400-12000 Ω	180-2000 Ω	450-2500 Ω	90-1000 Ω	900-2500 Ω
Accuracy up to 25% of range	-25%/+100%	-65%/+800%	-20%/+60%	-35%/+200%	-20%/+60%	-45%/+600%
Accuracy >25% to 50% of range	-25%/+100%	-65%/+800%	-33%/+200%	-45%/+500%	-33%/+200%	-45%/+600%
Accuracy >50% to 80% of range	-40%/+400%	-65%/+800%	-45%/+600%	-50%/+1200%	-45%/+600%	-45%/+600%
Accuracy >80% to 100% of range	-40%/+400%	-65%/+800%	-50%/+2000%	-50%/+2000%	-50%/+2000%	-50%/+2000%
Current Measurement⁴						
Low Range / High Range	3A / 30A	1A / 10A	6A / 60A	6A / 60A	12A / 120A	3A / 30A
Low Range Accuracy	0.05% + 3mA	0.05% + 2.5mA	0.05% + 5mA	0.05% + 5mA	0.05% + 10mA	0.05% + 3mA
High Range Accuracy	0.05% + 6mA	0.05% + 5mA	0.05% + 10mA	0.05% + 10mA	0.05% + 20mA	0.05% + 6mA
Voltage Measurement⁵						
Low Range / High Range	6V / 60V	24V / 240V	6V / 60V	15V / 150V	6V / 60V	15V / 150V
Low Range Accuracy	0.05% + 3mV	0.05% + 10mV	0.05% + 3 mV	0.05% + 8mV	0.05% + 3mV	0.05% + 8mV
High Range Accuracy	0.05% + 8mV	0.05% + 20mV	0.05% + 8 mV	0.05% + 16mV	0.05% + 8mV	0.05% + 16mV
Power Measurement⁷						
Accuracy	0.1% + 0.4W	0.1% + 1.2W	0.1% + 0.6W	0.1% + 1.6W	0.1% + 1.3W	0.1% + 0.9W



b) Programación de la Carga electrónica

A continuación explicaremos como se programa la carga electrónica por el teclado del panel frontal, para configurarla de manera que podamos realizar los ensayos de este proyecto.

Primero debemos saber para que se sirve cada botón del teclado del panel frontal. Esto se puede en la siguiente figura extraída de la guía del usuario del fabricante

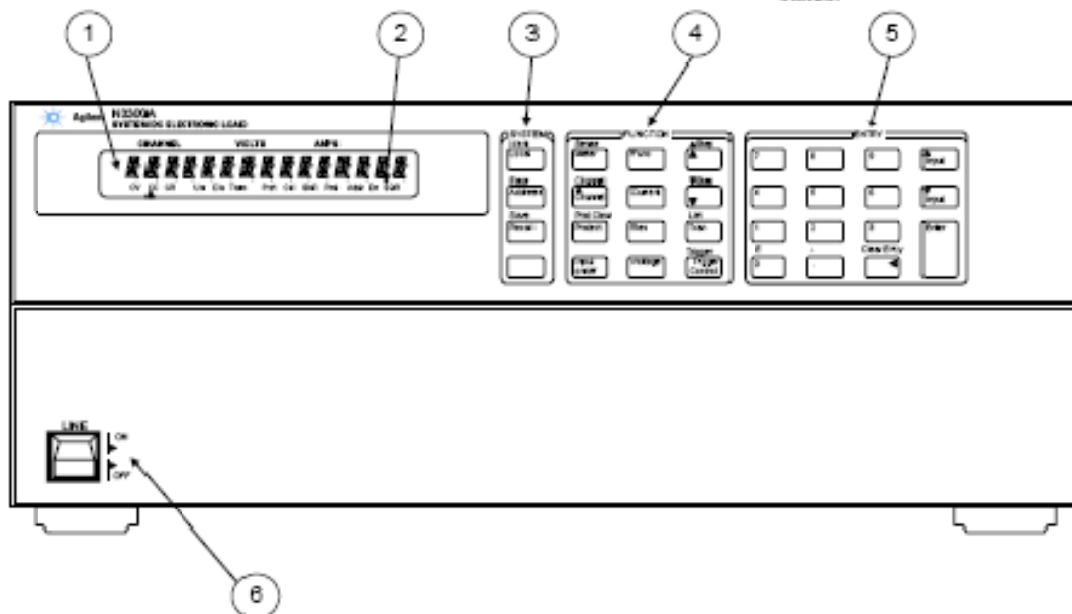
Quick Reference

The Front Panel -At a Glance

① 15-character display shows channel, voltage and current measurements.

② Annunciators indicate operating modes and status conditions.

③ System keys:
♦ Return to Local mode.
♦ Set the GPIB address.
♦ Set the RS-232 interface.
♦ Display SCPI error codes.
♦ Save and recall instrument states.

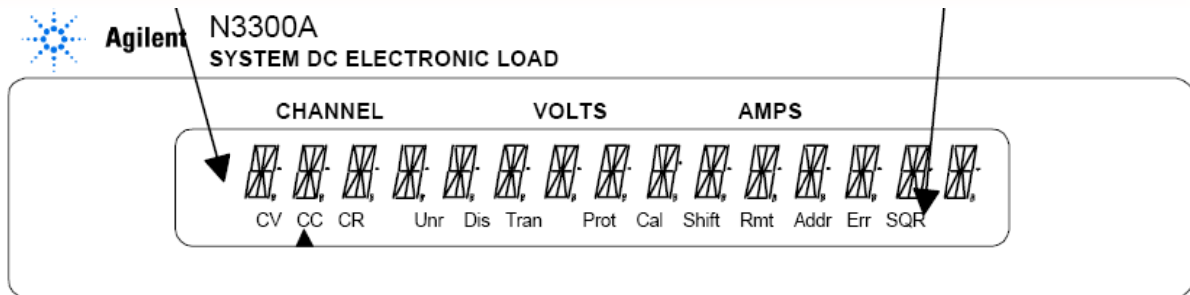


④ Function keys:
♦ Select metering functions.
♦ Enable/disable input.
♦ Program current, resistance and voltage modes.
♦ Set and clear protection functions.
♦ Scroll through front panel menu commands.

⑤ Entry keys:
♦ Enter values.
♦ Increment or decrement values.

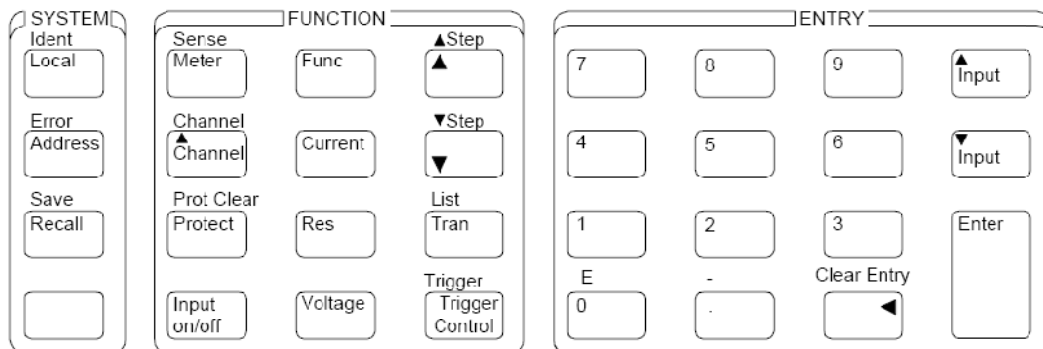
⑥ Turns the electronic load on and off.

Panel frontal – identificación de principales elementos



- ϕ1 A list is in progress
- CV The electronic load channel is in constant-voltage mode.
- CC The electronic load channel is in constant-current mode.
- CR The electronic load channel is in constant-resistance mode.
- Unr The electronic load channel is in an unregulated state.
- Dis The electronic load channel measurement is disabled (off).
- Tran The electronic load channel is in transient operation.
- Prot One of the electronic load's channel protection feature is activated.
- Cal The electronic load is in calibration mode.
- Shift The Shift key is pressed to access an alternate key function.
- Rmt The selected interface (GPIB or RS-232) is in a remote state.
- Addr The interface is addressed to talk or to listen.
- Err There is a message in the SCPI error queue.
- SQR The interface is requesting service from the controller.

Pantalla de información – significado de abreviaturas



Teclado del panel frontal

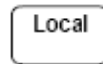
Ahora se procede a describir que secuencia de acciones debemos tomar para programar la fuente de acuerdo a las necesidades de este PFC.

- **Primero** ➤ Debemos encender la carga electrónica dándole al interruptor situado a la izquierda – debajo, que dice “on - off”.

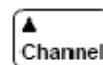




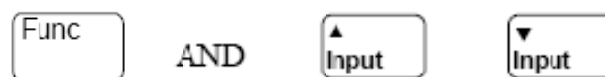
- **Segundo** > Ahora debemos pulsar el botón **“Local”**, de esta manera le estamos diciendo a la carga electrónica que procederemos a programarla localmente, es decir, mediante el teclado del panel frontal. Imposibilitando la entrada de comandos por algún puerto de ordenador como el GPIB.



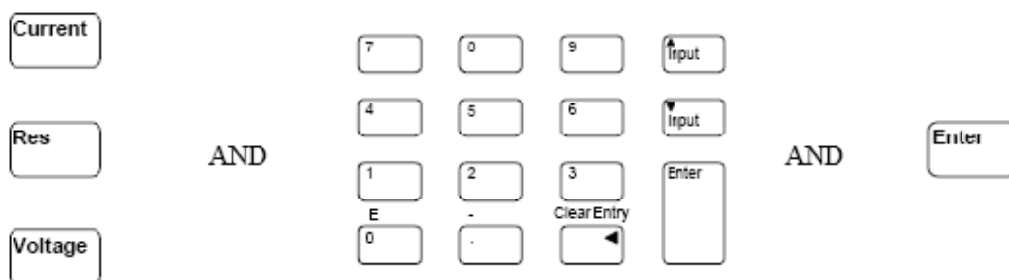
- **Tercero** > Ahora debemos indicarle a la carga electrónica sobre qué canal estamos trabajando, en nuestro caso es el canal 2. Así pues debemos presionar el botón **“channel”** hasta ver en la pantalla el canal deseado.



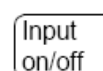
- **Cuarto** > Ahora procedemos a programar la fuente para que funcione en modo corriente constante CC, para ello debemos pulsar primero el botón **“Func”**, luego pulsaremos los botones **“input”** para seleccionar el modo deseado.



- **Quinto** > El siguiente paso es decirle a la carga electrónica a que intensidad queremos descargar la batería, para lo cual debemos pulsar la tecla **“Current”**, luego introducimos el valor deseado con el teclado numérico y finalmente pulsamos **“enter”**

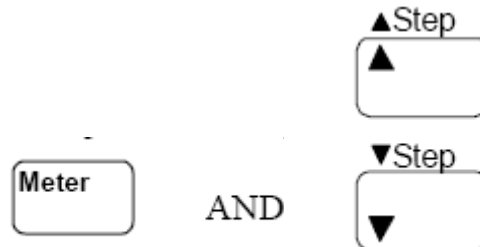


- **Sexto** > Llegados a este punto tenemos la carga electrónica lista para realizar un ensayo de descarga a intensidad constante. Para comenzar nuestro ensayo solo debemos pulsar el botón **“input on/off”**, este botón hace que comience la descarga a intensidad constante, cuando la carga está conectada (on) en la pantalla de la CEP se apagara el indicador que dice **“Dis”**





- **Séptimo** > A modo informativo hay que indicar que si queremos consultar en cualquier momento alguna de las variables eléctricas instantáneas como la tensión, intensidad, potencia, etc. Debemos pulsar la siguiente secuencia de teclas: “meter” luego “step”.



1.5 Dispositivo de desconexión de la batería

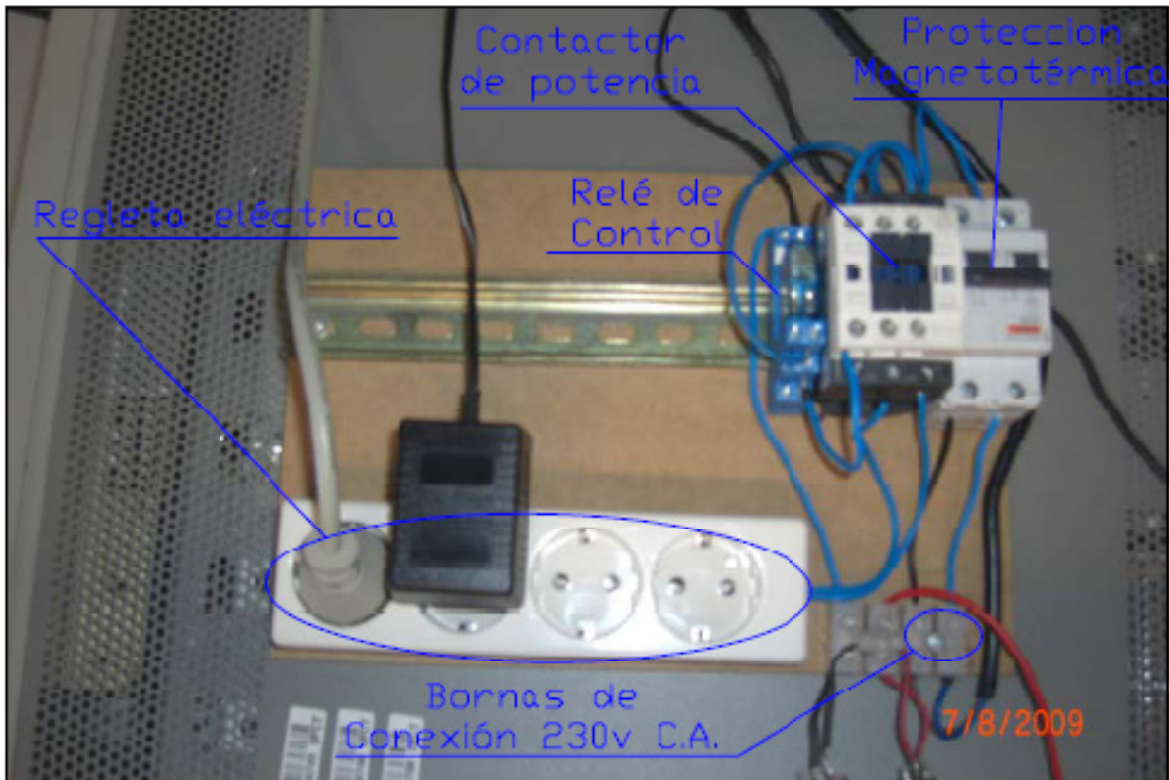
Todas las baterías poseen una tensión mínima a la que se puede descargar llamada **tensión final de descarga**. En nuestro caso el fabricante nos dice que esta tensión puede variar entre 1,71v y 1,8v por celda, o 10,26v y 11,1v para la batería de 12v, dependiendo del régimen de descarga aplicado (C1, C3, C5, C10, C100). Se hablara más detalladamente sobre las diferentes descargas en el apartado 3.2.

El interés en hacer que la batería se desconecte automáticamente, radica en la pérdida de tiempo que supondría tener que esperar a que la batería se descargue, sobre todo en las descargas a intensidades muy bajas en las que se tarda más de 50 horas en producirse la descarga total de la batería.

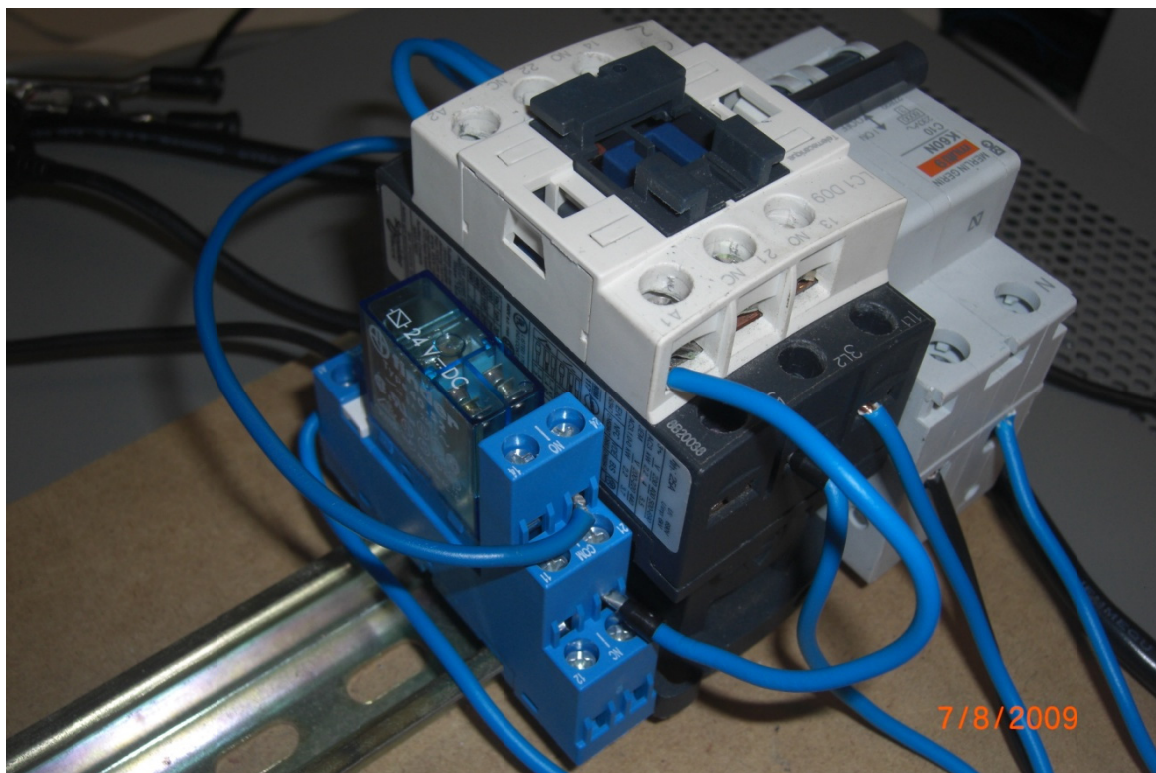
a) Descripción del sistema de desconexión automática.

Como hemos explicado la batería puede descargarse a intensidad constante hasta llegar a ese valor mínimo de tensión comprendido entre 10,26v y 11,1v, Si alcanzada esta tensión continuásemos descargando la batería, estaríamos disminuyendo su vida útil, incluso podríamos llegar a averiarla.

Es por esta razón que se ha diseñado este dispositivo que en pocas palabras lo que hace es: teniendo como variable de entrada la tensión de la batería, produce la apertura de un relé cuando la tensión llega a un determinado mínimo que lo regularemos mediante un par de potenciómetros.



Sistema de desconexión automática – piezas que lo componen



Detalle de el relé de control y del Contactor



- **Detalle de piezas que componen el sistema de desconexión**

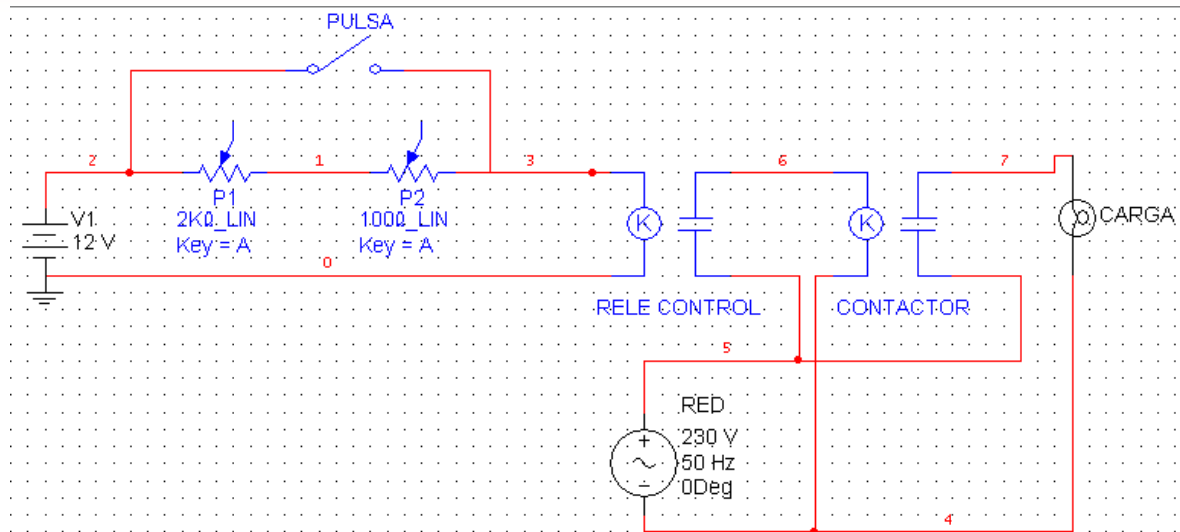
Ahora procederemos a detallar un listado de las piezas que componen el sistema de desconexión automática:

- **Protección Magneto-térmica:** su función es la de actuar como protección en caso de algún cortocircuito en el circuito de potencia y actuar como interruptor de encendido.
- **Contactor de potencia:** Es accionado por un contacto NA (normal abierto) del relé de control, su función es la de proveer tensión 230V a la regleta eléctrica de conexión.
- **Regleta eléctrica:** Es una regleta de conexión tipo Shuko, en ella se conectará la carga electrónica, así cuando actúe el contactor y deje sin alimentación a esta regleta se apagará la carga electrónica y por consiguiente dejará de descargarse la batería.
- **Relé de control:** Este dispositivo es controlado por la tensión de la batería reducida mediante los potenciómetros de regulación. Sirve para controlar el circuito de potencia a través del contactor.
- **Bornes de conexión a 230V:** Aquí se conectará un cable que alimentará el dispositivo de desconexión automática.
- **Potenciómetros:** El sistema tiene dos potenciómetros que regularán la tensión de la batería a la deseada para que produzca la desconexión. Un potenciómetro es de $2K\Omega$ y el otro es de 100Ω , así obtendremos una mayor sensibilidad, cosa que nos facilitará la tarea de regulación de la tensión de desconexión.

- **Explicación del funcionamiento del dispositivo**

Ahora procederemos a describir cómo funciona este dispositivo, para ello se ha reproducido un esquema eléctrico en el que se puede ver cómo está formado el sistema de desconexión.

Este consta de dos partes claramente diferenciadas, el circuito de control a la izquierda del Relé de Control, funciona con CC (corriente continua) de la batería, y el circuito de potencia a la derecha de dicho relé funciona con CA a una tensión de 230V.



Esquema eléctrico del sistema de desconexión

Una vez que hemos regulado los potenciómetros (punto 15 - b) se procederá a conectar la batería entre el punto 2 del esquema y el punto 0, seguidamente se hará un puente (PULSA) que aplicará aproximadamente 12V directamente sobre la bobina del relé de control, una vez que se activa el relé la tensión que se suministra a través de los potenciómetros es suficiente para mantener la bobina del relé accionada. Esto provocará que el contacto NA del relé de control se cierre y por consiguiente accione también el contactor dando así alimentación a la carga electrónica. Ahora comenzaremos la descarga de la batería.

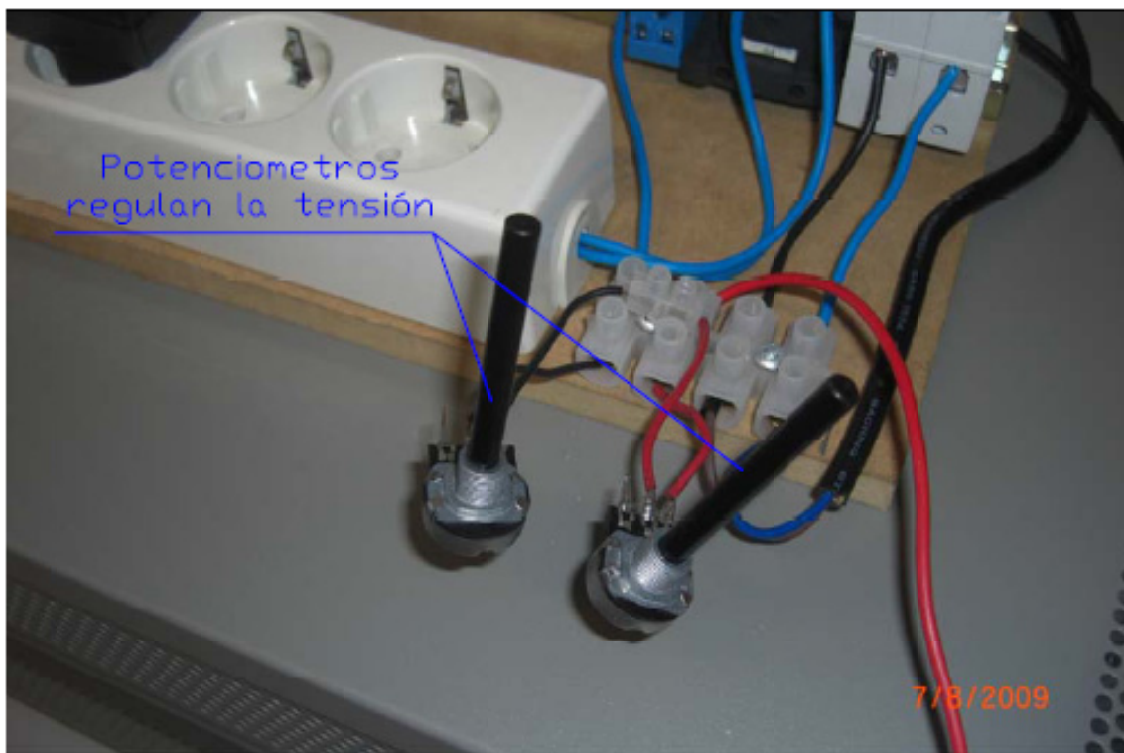
Cuando estamos descargando la batería la tensión de ésta irá disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar una tensión final de descarga que hemos regulado con los potenciómetros. Una vez que la tensión alcanza este punto mínimo la diferencia de potencial sobre la bobina del relé es demasiado pequeña para mantenerla activa, por lo tanto se produce una conmutación del contacto del relé de control, que lleva a que se desconecte la bobina del contactor y por consiguiente la carga electrónica quedara sin suministro eléctrico. Al no tener suministro la carga electrónica se produce la anulación de la descarga de la batería dejando de descargarse a intensidad constante.

b) Regulación del sistema de desconexión automática.

En este punto trataremos los pasos a seguir para regular los potenciómetros con el fin de que la conmutación del relé de control se produzca a la tensión de la batería que nosotros deseemos, entre 10,26V y 11,1 V. Para realizar esta regulación necesitaremos una fuente de tensión regulable, que “simulará” la tensión entre los bornes de la batería.



Fuente de tensión regulable



Detalle de potenciómetros de calibrado de la tensión de desconexión

Los pasos a seguir para la regulación son los siguientes:

- **Primero** > Desconectar la batería del dispositivo, y conectar la fuente de alimentación entre los puntos 2 y 0 del esquema eléctrico, estableciendo una tensión entre dichos puntos de unos 13 o 14v.



- **Segundo** > Debemos asegurarnos de que la resistencia en los potenciómetros es la menor posible.
- **Tercero** > Ahora procedemos a darle al pulsador (PULSA) para aplicar esos 13 v directamente sobre la bobina del relé de control, esto hará que conmuten los contactos del relé, accionando el contactor y encendiendo la carga electrónica programable.
- **Cuarto** > A continuación se comienzan las pruebas de ajuste, para las cuales se procederá a disminuir la tensión de la fuente regulable hasta alcanzar nuestro valor deseado de desconexión de la batería, de esta forma al reducir la tensión de la fuente, la tensión en la bobina del relé de control será suficiente para que no se desconecte el relé.
- **Quinto** > Ahora debemos comenzar a aumentar la resistencia de los potenciómetros lentamente hasta conseguir que la caída de tensión en ellos sea la suficiente como para producir que la bobina de desconecte y por consiguiente se apague la carga electrónica.
- **Sexto** > Repetir los pasos tercero, cuarto y quinto hasta conseguir que al ir disminuyendo la tensión aplicada entre los puntos 2 y 0 desde 13v, hasta el valor de tensión deseado, el relé conmute a esa tensión deseada llamada tensión final de descarga.
- **Séptimo** > Ya tenemos el dispositivo de desconexión correctamente regulado, solo debemos desconectar la fuente de tensión regulable y conectar la batería para comenzar nuestro ensayo.



2 MODELOS

Para realizar este PFC nos hemos basado en 3 artículos científicos que hablan de modelos de 3^{er} y 4^{to} orden para la simulación del comportamiento de baterías, estos artículos fueron facilitados por el director del proyecto para su estudio, dichos artículos son los que se detallan a continuación:

➤ **Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery**

Este artículo nos propone un modelo de 4^{to} orden para la simulación de las cargas y descargas de una batería, este modelo como cabe esperar es algo más complejo de ajustar que el de 3^{er} orden, pero se obtienen mejores curvas de respuesta.

Fecha de publicación: 1990

Autores:

- Giglioli (Universidad de Pisa, Italia).
- Buonarota y Menga (ENEL – D.S.R., Italia).
- Massimo Ceraolo (C.R.I.T.A., Italia).

Se puede consultar en el ANEXO I de este proyecto.

➤ **New Dynamical Models of lead-acid batteries**

Este otro artículo nos habla de un modelo de 3^{er} orden, para la simulación del comportamiento de baterías. Básicamente este es el modelo que se ha implementado en el PC. Se ha utilizado en un 95% aproximadamente, lo que no se ha utilizado es la obtención del parámetro de la capacidad de la batería a una determinada intensidad de descarga y temperatura **C(I,tita)**, ya que no nos daba buenos resultados. Y como este parámetro lo podemos calcular a partir de los ensayos realizados, como el sumatorio de las corrientes en cada muestra por el tiempo entre muestra, es decir la carga eléctrica extraída.

Fecha de publicación: 4 de Noviembre de 2000.

Autor:

- Massimo Ceraolo (Investigador del Departamento de sistemas eléctricos y automatización de la Universidad de Pisa., Italia).

Se puede consultar en el ANEXO II de este proyecto.



➤ **Dynamical models of lead-acid batteries implementation issues**

Este artículo habla sobre como implementar el modelo de tercer orden propuesto en el artículo anterior, trata temas como la elección de un modelo adecuado, la obtención de los parámetros de la capacidad de la batería, parámetros del modelo térmico de la batería, etc.

Fecha de publicación: 1 de Marzo de 2002.

Autores:

- Massimo Ceraolo (Investigador del Departamento de sistemas eléctricos y automatización de la Universidad de Pisa., Italia).
- Stefano Barsali (investigador en el campo de sistemas eléctricos de potencia en la Universidad de Pisa, Italia)

Se puede consultar en el ANEXO III de este proyecto.

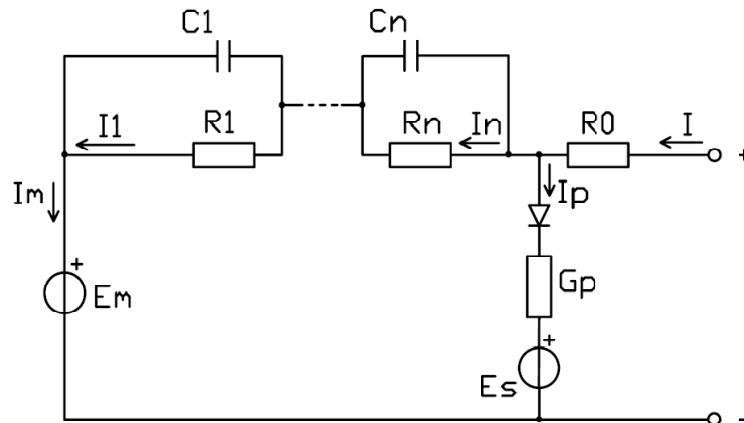
Estos tres artículos se centran en hacer una analogía eléctrica del comportamiento de las baterías, ya que así se consigue que sea un modelo de fácil comprensión para los ingenieros eléctricos, de esta manera el técnico para su análisis utiliza su conocimiento básico sobre redes eléctricas para describir los complejos fenómenos internos de las baterías.

Ahora procederemos a detallar y explicar las características y ecuaciones de los modelo propuestos en los artículos científicos, además hablaremos también de que ecuaciones hemos utilizado para nuestro modelo. Para ello dividiremos la información en 2 apartados, el 2.1 en el que hablaremos del modelo de 3^{er} orden del artículo y el 2.2 en el que hablaremos del modelo de 4^{to} orden.



2.1 Modelo de 3^{er} Orden

Como hemos dicho anteriormente nuestro modelo de 3er orden validado se basa en un 95% en este modelo que trataremos a continuación. El esquema de la red eléctrica considerada en este modelo es el siguiente, aunque luego dependiendo de lo que se desea simular se puede simplificar:

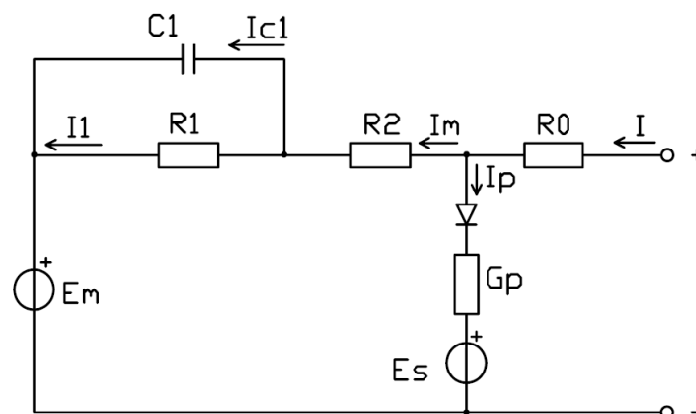


Red eléctrica equivalente de batería plomo-ácido, con N resistencias

El proceso de identificación de las constantes es muy complejo, y aumenta rápidamente con el número de bloques RC considerados.

Para el propósito de este PFC, con 1 o 2 bloques es suficiente para la simulación del comportamiento dinámico de la batería entorno a unos márgenes de corriente.

Sin embargo cuando necesitemos simular situaciones muy diferentes unas de otras no tendremos más remedio que recurrir a aumentar el número de bloques RC, aunque esto complique la identificación de los parámetros.



Red eléctrica equivalente de modelo de 3^{er} orden,
Simplificada con 2 bloques RC

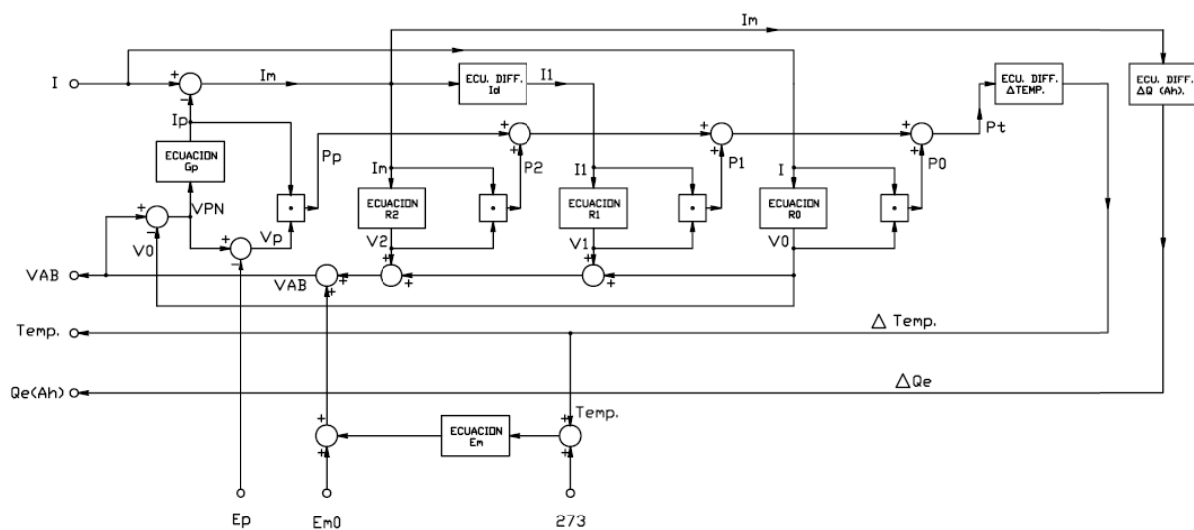


El circuito eléctrico equivalente se divide en dos ramas:

- La rama de reacción principal (reversible), dependiendo de la precisión requerida, la respuesta de la batería puede ser aproximada por la suma de curvas exponenciales con diferentes constantes de tiempo más un término proporcional al escalón de corriente.
- La rama que une los puntos P y N es la rama de reacción parásita (irreversible) sirve para simular que la eficiencia en la carga de la batería no es igual a 1.

Es importante aclarar que durante la simulación de descargas de batería la intensidad en la rama de reacción parásita puede considerarse igual a 0, pudiendo eliminarse del modelo, lo mismo sucede con la resistencia R_2 , simplificándose aún más el modelo.

A continuación podemos ver un diagrama de bloques de este modelo:



• DEFINICION DE ECUACIONES Y CONSTANTES

Las variables de estado de este sistema son:

- **$Q_e[\text{Ah}]$** es la carga eléctrica extraída de la batería, es decir es la carga que necesitamos para llenar la batería.
- **$\theta[^\circ\text{C}]$** es la temperatura del electrolito.
- **$I_m[\text{A}]$** e **$I_p[\text{A}]$** son la corriente de carga de transferencia y la corriente parásita respectivamente.



Las ecuaciones algebraicas que definen el comportamiento del modelo de 3er orden son:

$$E_m = E_{m0} - K_e(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21}(1 - SOC))}{1 + \exp(A_{22} \frac{I_m}{I^*})}$$

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

$$I_p = G_p V_{PN} \quad G_p = G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

NOTA: En el artículo no se dan las ecuaciones que representa la tensión entre los bornes de la batería, ni la que representa la potencia generada internamente en forma de calor, etc. Aunque estas ecuaciones son muy fáciles de suponer, analizando el circuito eléctrico equivalente:

$$V_{ab} = E_m + I_m \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 + I \cdot R_0$$

$$P_t = I_1^2 \cdot R_1 + I_m^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_0 + I_p(V_{pn} - E_p)$$

$$I = I_m + I_p$$

$$V_{pn} = V_{ab} - I \cdot R_0$$

Las 3 ecuaciones diferenciales que definen este modelo son las siguientes:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (I_m - I_1) \quad \frac{dQ_e}{dt} = -I_m$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{C_\theta} \left[P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right]$$



Las constantes y parámetros utilizados en este modelo son:

Parámetros que se refieren a la capacidad de la batería:

- I^* intensidad de descarga representativa.
- C_0^* es la capacidad a 0°C e intensidad de descarga representativa.
- K_c constante del modelo.
- Θ_f temperatura de congelación del electrolito.
- ϵ constante del modelo.
- δ constante del modelo.

Parámetros referentes a la rama principal:

- E_{m0} tensión inicial de la fuente en la rama principal.
- K_e constante del modelo.
- **Tau1** constante de exponencial.
- R_{00} constante del modelo.
- R_{10} constante del modelo.
- A_0 constante del modelo.
- R_{20} contante del modelo.
- A_{21} constante del modelo.
- A_{22} constante del modelo.

Parámetros que se refieren a la rama parásita:

- $E_p = E_{p0}$ fuente de tensión interna de la rama (cte).
- V_{p0} constante del modelo.
- A_p constante del modelo.

Parámetros que se refieren al modelo térmico:

- C_θ capacitancia térmica de la batería.
- R_θ resistencia térmica entre el ambiente y la batería.



Otros parámetros:

- Θ_a temperatura ambiente.
- P_s calor generado internamente en la batería.

• CALCULO DE LA CAPACIDAD Y EL “ESTADO DE LA CARGA”(SOC)

Como podemos ver hasta este punto el modelo del artículo y el que hemos implementado son iguales, a continuación explicaremos el cálculo de la capacidad de la batería ya que este punto difiere con respecto al modelo publicado en el artículo. Para el cálculo de la capacidad se proponen en el artículo lo siguiente:

Para una corriente de descarga fija la siguiente expresión:

$$C(I, \theta)_{I, \theta = const} = C_0(I) \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon \quad (\theta > \theta_f)$$

Donde: $C_0(I)$ es una función empírica de la corriente de descarga y es igual a la capacidad de la batería a 0°C. Según este artículo mediante pruebas experimentales se ha llegado a la siguiente función que depende de I^* (corriente representativa de la descarga) afirma que da buenos resultados:

$$C_0(I) = \frac{K_c C_{0*}}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

Combinando las dos fórmulas anteriores se llega a que la capacidad de la batería a una determinada intensidad de descarga y una determinada temperatura toma como valor:

$$C_0(I, \theta) = \frac{K_c C_{0*} \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

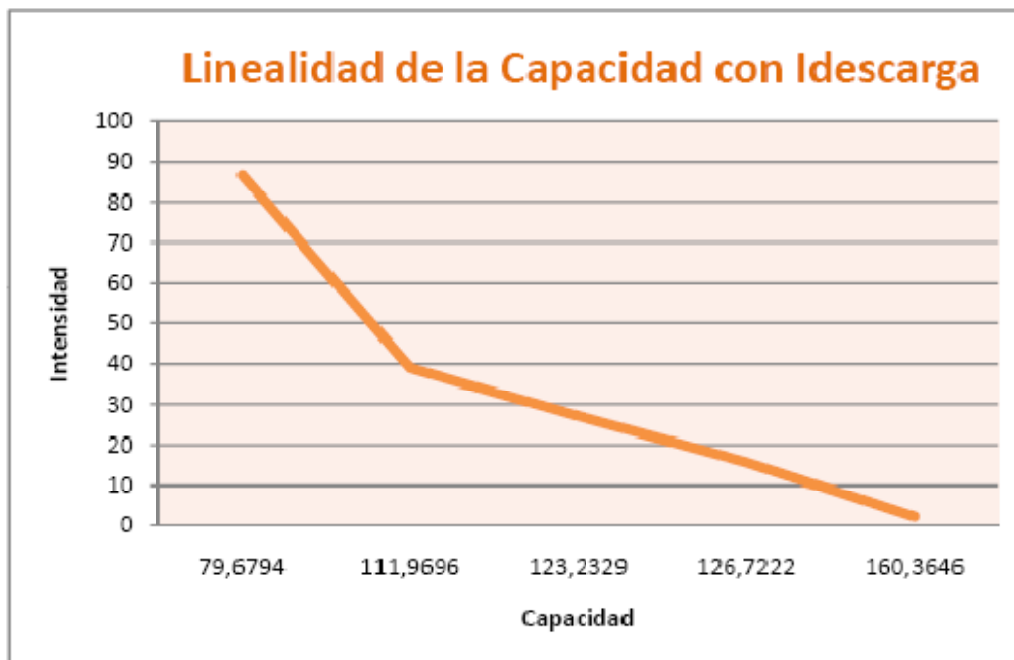
Estas fórmulas **no nos daban buenos resultados**, ya que al intentar simular la capacidad a una determinada temperatura e Intensidad nos daba mucho menos que la capacidad real medida en los ensayos, en concreto el resultado no llegaba más allá de los 70 u 80 Ah, esto conllevaba a que el valor de SOC y DOC se pasase a negativo a los pocos segundos de comenzar la simulación, y por consiguiente se producía la parada repentina de la simulación.



Así pues nos hemos centrado en el cálculo de la capacidad propuesto en el modelo de 4^{to} orden (ANEXO I) para una corriente de descarga fija, utilizándose la siguiente expresión:

$$C^*(\theta) = T_n I^*(\theta) = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right)^\epsilon$$

Para el cálculo de la capacidad a una determinada temperatura e intensidad de descarga, se han estudiado los datos obtenidos de los ensayos, llegando a la conclusión de que el comportamiento de la capacidad ante la corriente de descarga se puede considerar prácticamente lineal para intensidades de menos de 40A, como se puede ver en el siguiente gráfico:



Así pues, por ejemplo si queremos simular una descarga a 30A, debemos interpolar linealmente el valor de la capacidad a partir de la Intensidad para meterlo como dato en la simulación.

También se podría calcular la ecuación de la recta que representa la capacidad de la batería como función de la corriente de descarga, aunque también influye la temperatura del electrolito pero de manera prácticamente despreciable en nuestras condiciones de ensayo.

$$Y = -0,307419X + 131,559$$



Con esta ecuación calcularemos el valor de la $C(I, \theta)$ en nuestro modelo implementado en Simulink, cuando no hayamos realizado el ensayo, es decir para ver cómo reacciona la batería ante condiciones que no se hayan experimentado, por ejemplo $I_d=30A$.

Dos parámetros muy importantes en la modelización son el estado de la carga (SOC o “State of Charge”) y la profundidad de la carga (DOC o “Depth of Charge”) en cada momento de la simulación, ya que estos parámetros influyen en los valores instantáneos que toman las resistencias y la E_m . Como aclaración hay que decir que:

SOC > representa cuan llena esta la batería con referencia a la máxima capacidad que esta puede dar a una temperatura dada. Se proponen en el artículo los siguientes valores:

$$SOC = 1 - Q_e / C(0, \theta) = 1 - Q_e / (K_c C(I^*))$$

DOC > representa cuan llena esta la batería con referencia a la capacidad al actual régimen de descarga. Se propone en el artículo el siguiente valor:

$$DOC = 1 - Q_e / C(I_{avg}, \theta)$$



• EJEMPLOS DADOS EN EL ARTICULO

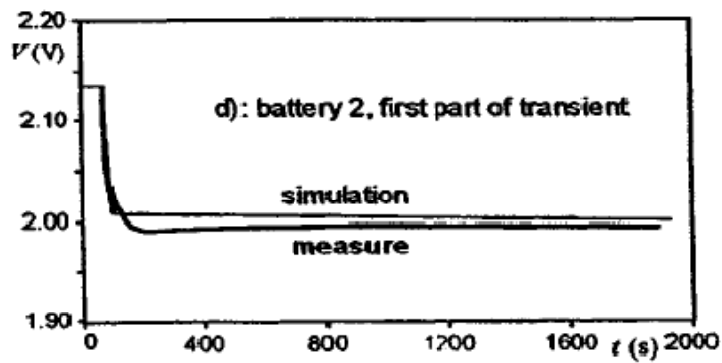
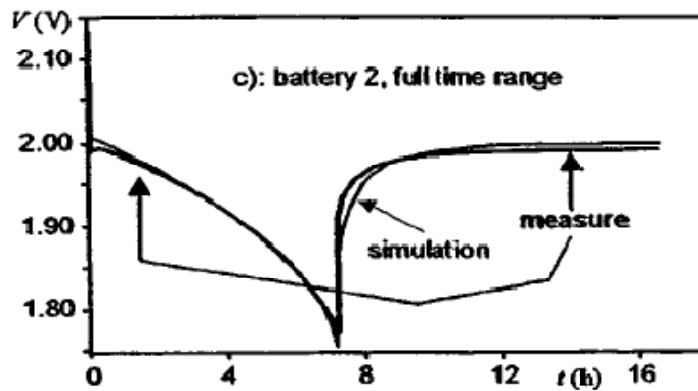
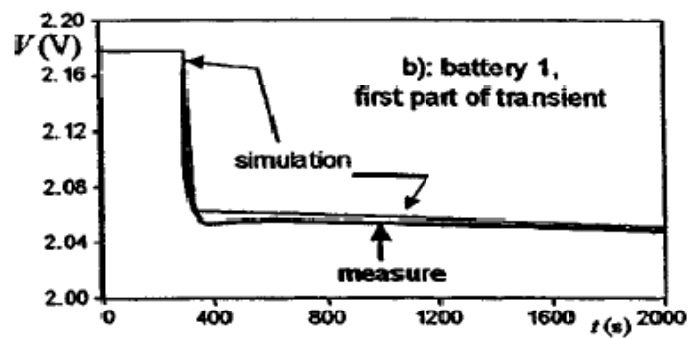
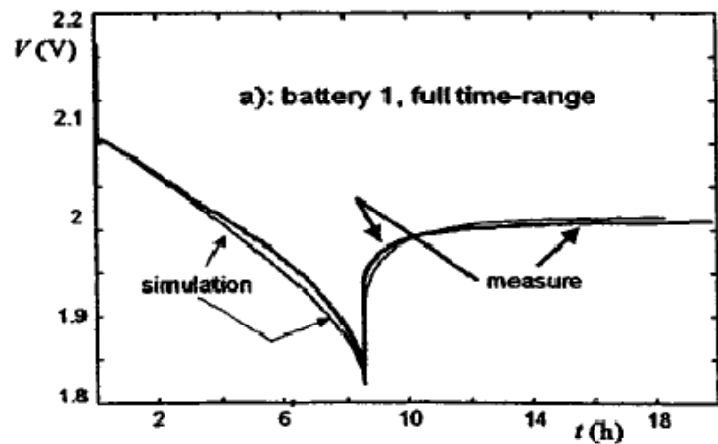
PARAMETERS OF BATTERY 1 (ONLY PARAMETERS NEEDED FOR DISCHARGE SIMULATIONS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 51.5 \text{ A}$ $K_c = 1.11$ $\varepsilon = 1.19$	$C_0 = 317.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.75$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_I = 7200 \text{ s}$ $K_E = 0.839 \times 10^{-3} \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.20$	$E_{m0} = 2.18 \text{ V}$ $R_{I0} = 0.4 \text{ m}\Omega$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_\theta = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_\theta = 0.2^\circ\text{C/W}$

PARAMETERS OF BATTERY 2 (ALL PARAMETERS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 49 \text{ A}$ $K_c = 1.18$ $\varepsilon = 1.29$	$C_0 = 261.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.40$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_I = 5000 \text{ s}$ $K_E = 0.580 \times 10^{-3} \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.30$ $A_{21} = -8.0$	$E_{m0} = 2.135 \text{ V}$ $R_{I0} = 0.7 \text{ m}\Omega$ $R_{20} = 15 \text{ m}\Omega$ $A_{22} = -8.45$
Parameters referring to the parasitic reaction branch of the electric equivalent	$E_p = 1.95 \text{ V}$ $G_{p0} = 2 \text{ pS}$	$V_{p0} = 0.1 \text{ V}$ $A_p = 2.0$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_\theta = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_\theta = 0.2^\circ\text{C/W}$

Parámetros de baterías del artículo



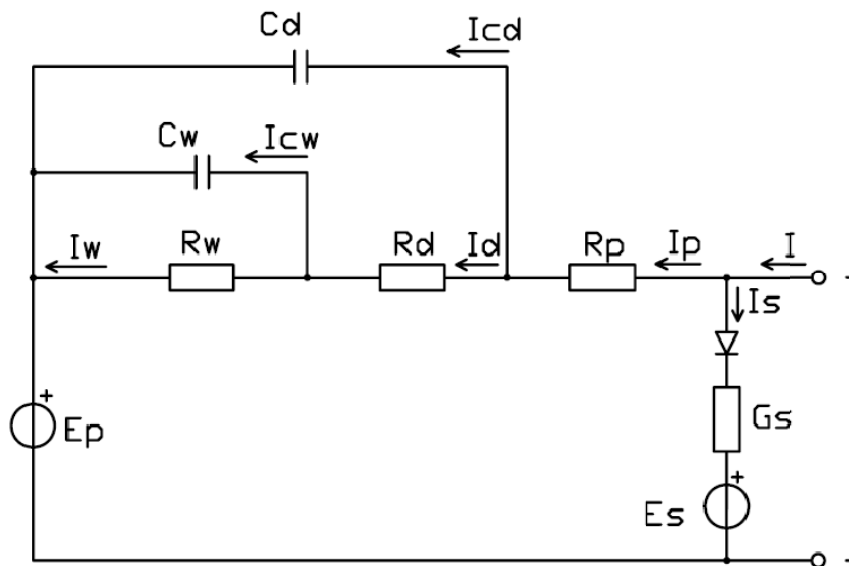
y

Gráficos de comparación ensayo – simulación



2.2 Modelo de 4^{to} Orden

Este modelo al ser un orden superior que el anteriormente explicado tiene una mejor representación de los fenómenos internos que suceden en las baterías. Por lo tanto se consigue un mejor ajuste de la simulación al ensayo realizado como es lógico esperar. El esquema de la red eléctrica considerada en este modelo es el siguiente:



Red eléctrica equivalente de una batería plomo – ácido

El circuito eléctrico equivalente se divide en dos ramas:

- La rama primaria "p" (reversible) con una red RC que representa los fenómenos óhmicos, de polarización y difusión de la batería, describiendo la respuesta dinámica del acumulador operando bajo condiciones variables.
- La rama que une los puntos + y - es la rama de reacción parásita "s" (irreversible), sirve para simular que la eficiencia en la carga de la batería no es igual a 1, porque hay pérdidas debido a la electrólisis del agua y a la auto descarga principalmente.

A continuación podemos ver un diagrama de bloques de este modelo, esto nos facilita la tarea de implementación en el PC:

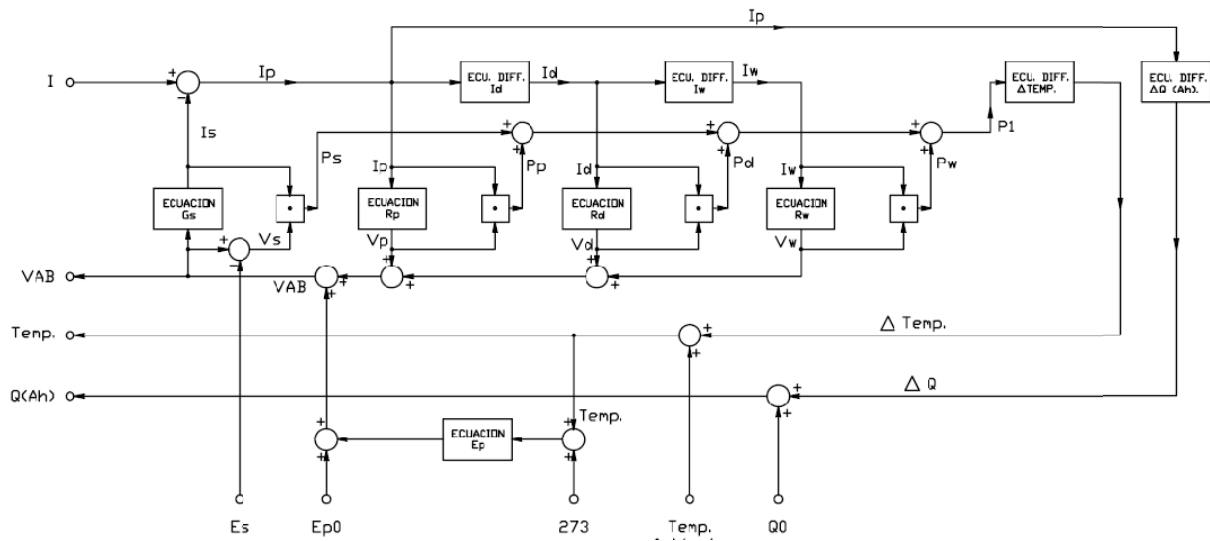


Diagrama de bloques modelo de 4^{to} orden

• DEFINICION DE ECUACIONES Y CONSTANTES

Las variables de estado de este sistema son:

- **Q[Ah]** es la carga eléctrica extraída de la batería, es decir es la carga que necesitamos para llenar la batería.
- **Δ(θ)[°C]** es el intervalo de temperatura entre el electrolito y el ambiente.
- **Id[A]** y **Iw[A]** son la corriente de carga de transferencia y la corriente de difusión respectivamente.

Las ecuaciones algebraicas que definen el modelo de 4^{to} orden son:

$$E_p = E_{p0} - K_e(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_p = R_{p0}(1 - \beta\theta) - R_c \ln(SOC)$$

$$R_d = R_{d0} \{ A_{d1} / (1 - SOC) + \exp[A_{d2}(1 - SOC)] \} [1 + \exp|A_{d3} I_d / I^*|]^{-1}$$

$$R_w = -R_c \ln [1 - (1 - SOC) / SOC (K_c - 1) |I_w / I^*|^{\delta}]$$

$$G_s = G_{s0} \exp [A_{sv} V_{AB} + A_{s\theta} (\theta - \theta_f)] / V_{AB}$$

$$V_{ab} - I_p \cdot R_p - I_d \cdot R_d - I_w \cdot R_w - E_p = 0$$

$$P_1 - I_p^2 \cdot R_p - I_d^2 \cdot R_d - I_w^2 \cdot R_w - I_s (V_{AB} - E_s) = 0$$



$$I_s - G_s V_{AB} = 0$$

$$I - I_p - I_s = 0$$

$$\theta - \theta_a - \Delta\theta = 0$$

Las 4 ecuaciones diferenciales que definen este modelo son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} &= \frac{1}{\tau_d} (I_p - I_d) & \frac{dI_w}{dt} &= \frac{1}{\tau_w} (I_d - I_w) \\ \frac{dQ_0}{dt} &= -I_p & \frac{d\Delta\theta}{dt} &= \frac{1}{\tau_\theta} [P_1 R - \Delta\theta] \end{aligned}$$

Las constantes y parámetros utilizados en este modelo son:

Parámetros que se refieren a la capacidad de la batería:

- **I*** intensidad de descarga representativa.
- **C₀** es la capacidad a 0°C.
- **C*(θ)** capacidad de la batería a tiempo de descarga T_n en función de la temperatura.
- **K_c** constante del modelo.
- **Θ_f** temperatura de congelación del electrolito.
- **ε** constante del modelo.
- **δ** parámetro del modelo.

Parámetros referentes a la rama principal:

- **E_{p0}** tensión inicial de la fuente en la rama principal.
- **K_e** constante del modelo.
- **Tau_d** constante de exponencial.
- **Tau_w** constante de exponencial
- **Tau_θ** constante de exponencial
- **R_{p0}** parámetro del modelo.



- R_{d0} parámetro del modelo.
- R_C parámetro del modelo.
- β constante del modelo.
- A_{d1} constante del modelo.
- A_{d2} constante del modelo.
- A_{d3} constante del modelo.

Parámetros que se refieren a la rama parásita:

- $E_s = E_{s0}$ fuente de tensión interna de la rama (cte).
- G_{s0} parámetro del modelo (conductancia).
- A_{sv} constante del modelo.
- $A_{s\theta}$ constante del modelo.

Parámetros que se refieren al modelo térmico:

- R resistencia térmica entre el ambiente y la batería.

Otros parámetros:

- Θ_a temperatura ambiente.
- Θ temperatura del electrolito.
- P_s calor generado internamente en la batería.
- C_n capacidad nominal de la batería.
- I_n Intensidad nominal de la batería.
- T_n tiempo nominal de descarga.
- θ_n temperatura nominal.



- **CALCULO DE LA CAPACIDAD Y EL “ESTADO DE LA CARGA”(SOC)**

Para el cálculo de la capacidad y el SOC (State-of-Charge) o estado de la carga en este modelo lo siguiente:

Para una corriente de descarga fija se sugiere la siguiente expresión:

$$C^*(\theta) = T_n I^*(\theta) = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^\varepsilon$$

La capacidad de la batería a una determinada intensidad de descarga y una determinada temperatura toma como valor de:

$$\frac{C_0(I, \theta)}{C^*(\theta)} = \frac{K_c}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

$$C_0(I, \theta) = C_0 \frac{K_c \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

Dos parámetros muy importantes en la modelización son el estado de la carga (SOC o “State of Charge”) y la profundidad de la carga (DOC o “Depth of Charge”) en cada momento de la simulación, ya que estos parámetros influyen en los valores instantáneos que toman las resistencias y la E_p . Como aclaración hay que decir que:

SOC > representa cuan llena esta la batería con referencia a la máxima capacidad que esta puede dar a una temperatura dada. Se proponen en el artículo los siguientes valores:

$$SOC = 1 - Q / (K_c C^*(\theta))$$

DOC > representa cuan llena esta la batería con referencia a la capacidad al actual régimen de descarga. Se propone en el artículo el siguiente valor:

$$DOC = 1 - Q / C(I_m, \theta)$$

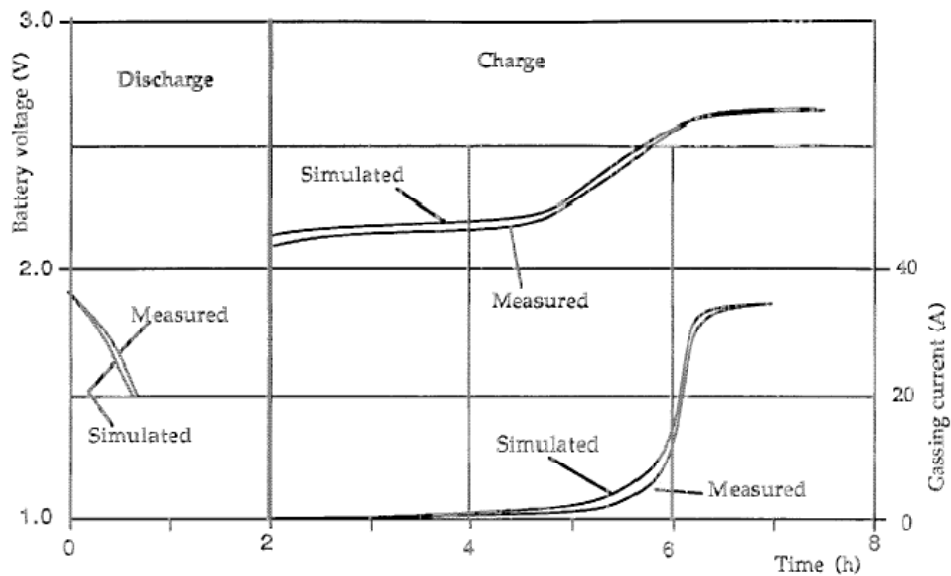


- **EJEMPLOS DADOS EN EL ARTICULO**

$C_n = 182\text{Ah}$, $I_n = 34\text{A}$, $\Theta_n = 30^\circ\text{C}$, then $T_n = 5.35\text{h}$
The values obtained for the other parameters are:

$C_0 = 139\text{Ah}$	$K_c = 1.9$	$\delta = 0.4$	$\epsilon = 0.6$
$p_0 = 2.14\text{V}$	$K_e = 0.54\text{mV}/^\circ\text{C}$		
$R_{p0} = 1.1\text{m}\Omega$	$R_c = 3.5\text{m}\Omega$	$R_{d0} = 10\text{m}\Omega$	
$A_{d1} = 8.5\text{E-}3$	$A_{d2} = -15$	$A_{d3} = -8.45$	
$G_{s0} = 0.4\text{pS}$	$A_{sv} = 9.95\text{V}^{-1}$	$A_{s\Theta} = 0.07^\circ\text{C}^{-1}$	
$\tau_d = 100\text{s}$	$\tau_w = 5400\text{s}$		
$\tau_\Theta = 1.44\text{e}4\text{s}$	$R = 1.2^\circ\text{C}/\text{W}$		

Datos de batería con la que se hizo el artículo



Curvas de carga y descarga



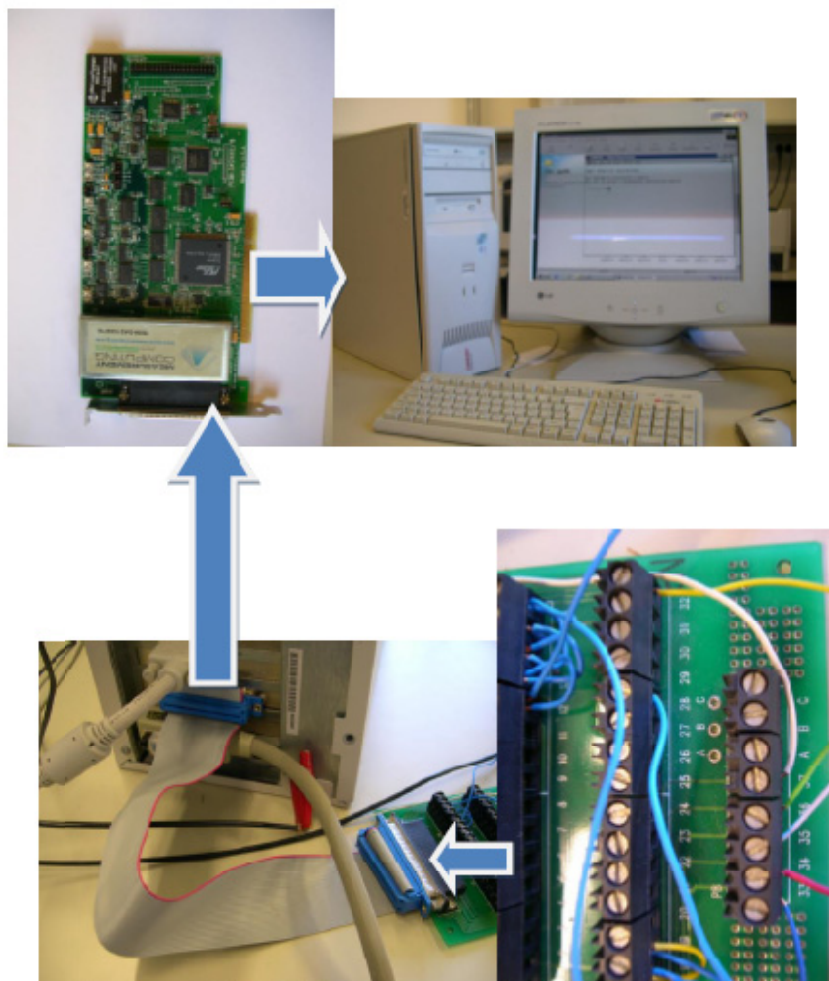
3 ENSAYOS-OBTENCION DE PARAMETROS

3.1 Adquisición de datos

El proceso para la toma de datos es el siguiente:

Las variables a medir se conectan a los pines de la tarjeta de adquisición de datos, pines del 37 al 34, en nuestro caso y por este orden. Posteriormente, un bus de datos envía la información a una tarjeta PCIM-DAS 1602/16 y esta información se recoge en nuestro PC a través del programa Adquisición de Datos que se encarga de visualizar el resultado obtenido de la medida de nuestras variables y crea un archivo con los datos del ensayo realizado.

Para entenderlo visualmente hemos recogido el proceso de la toma de datos en un esquema a partir de las fotos realizadas en el laboratorio.



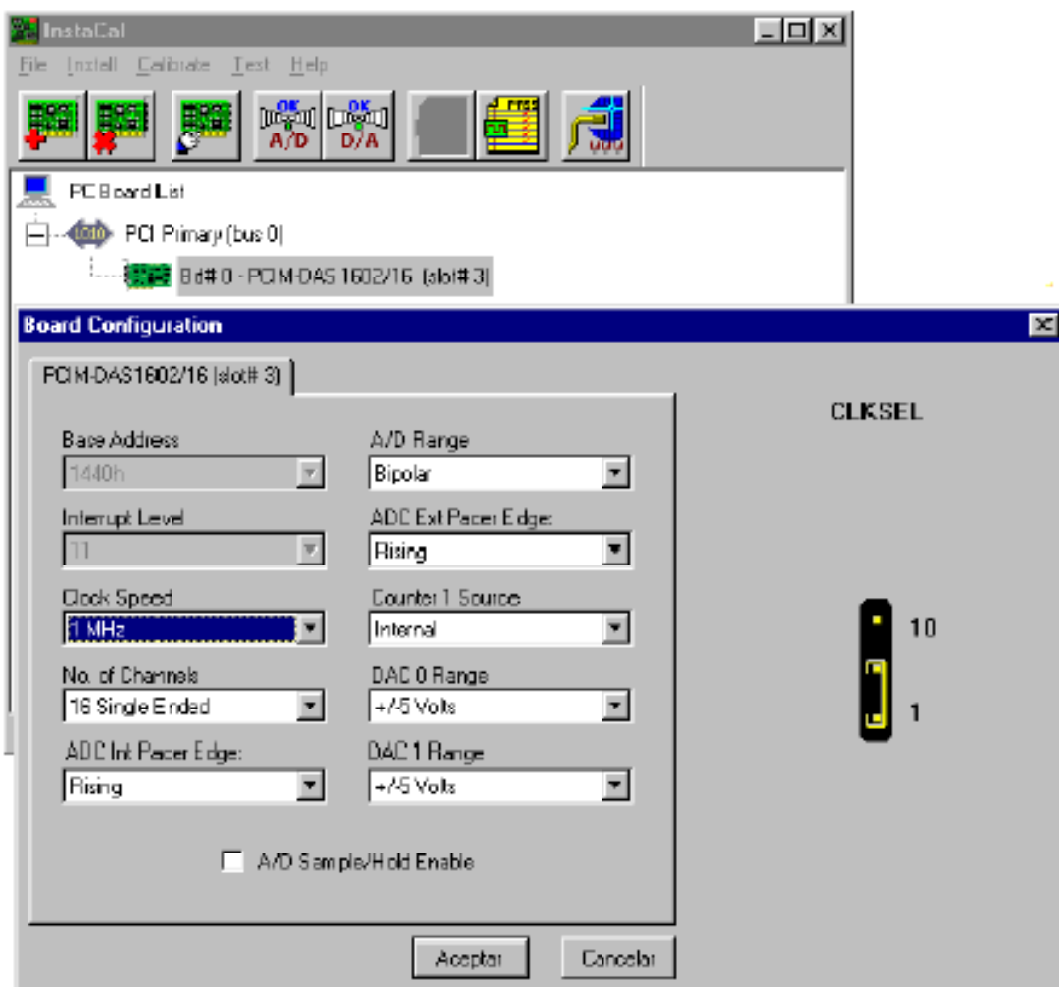
Recorrido que realizan los datos



En primer lugar, tendremos que instalar la tarjeta PCIM-DAS 1602/16, cuyos drivers son facilitados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Instalamos el programa Measurement Computing y al ejecutarlo nos aparecerá lo siguiente:



Es muy importante tener bien configurado el programa para que nuestra tarjeta pueda recoger los datos y mandarlos al programa Adquisición de datos



Configuración del programa



A continuación conectamos cada una de las variables a un pin de la tarjeta de adquisición de datos.

Conectaremos cada una de las variables ordenadamente, en nuestro caso hemos conectado la tensión medida por la carga electrónica al pin 37, la intensidad registrada por la carga electrónica el pin 36. La tensión medida por la sonda de tensión al pin 35 y la intensidad medida por la sonda amperimétrica al pin 34.

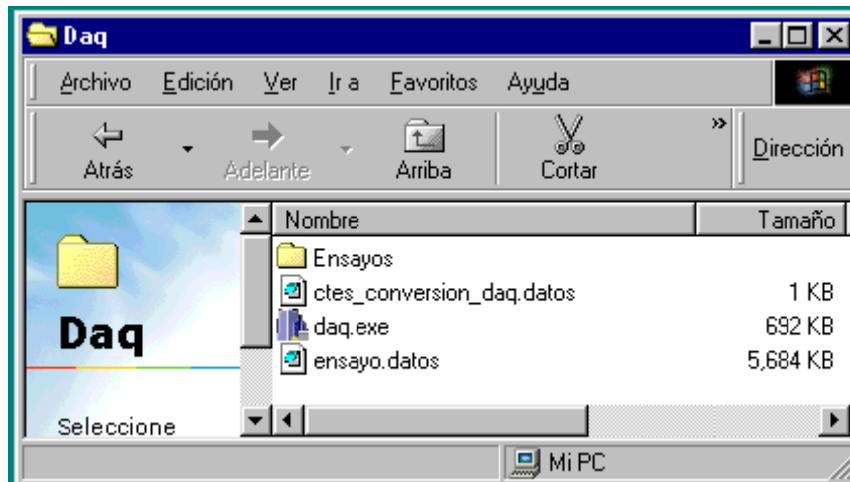
NOTA: Es muy importante tener en cuenta que trabajaremos con tensiones e intensidades elevadas, por ello se hará imprescindible el uso de sondas de tensión y pinzas amperimétricas, para no fundir la tarjeta de adquisición de datos.



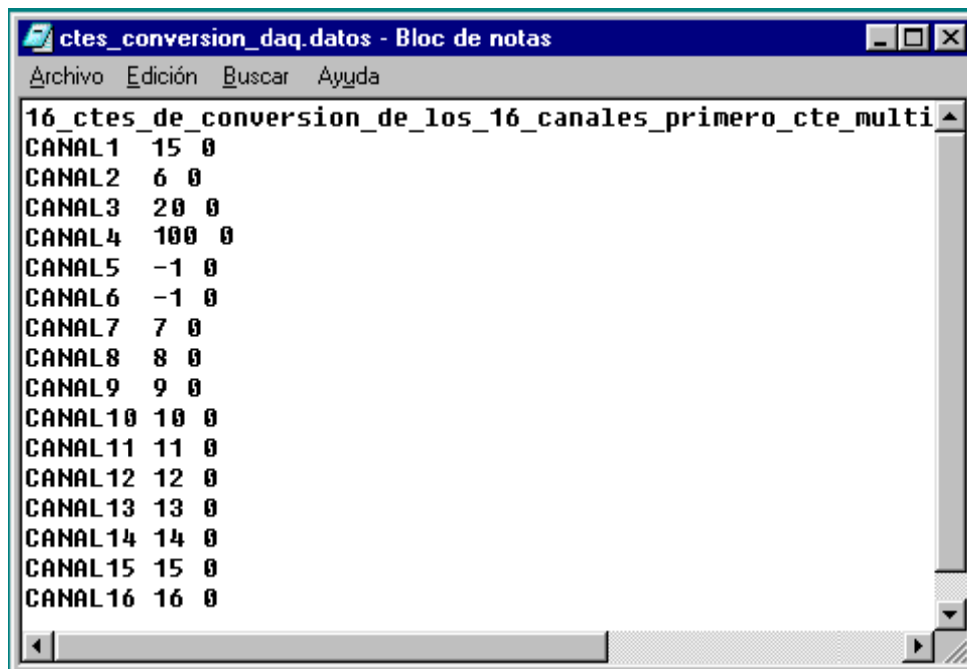
Pinza amperimétrica (izquierda) y sonda voltimétrica (derecha)

Esto permitirá reducir el rango de entrada a la tarjeta de adquisición a unos valores entre $\pm 10V$.

Ya estamos en disposición de utilizar el programa Adquisición de datos. En el escritorio de nuestro ordenador podemos encontrar la carpeta Daq.



Pinchamos sobre el icono ctes_conversion_daq.datos y nos aparecerá:



Constantes de conversión de datos

En este archivo establecemos las constantes de conversión que se van a aplicar a nuestras variables. En el caso del canal 1, estamos midiendo la tensión en la carga, como la carga electrónica nos la da en una escala de 0 a 10V, en función de el rango de tensión que le hayamos programado a la carga electrónica, en nuestro caso (0 – 150V), por lo tanto pondremos como constante 15. En el canal 2 medimos intensidad en la carga electrónica, y en este caso al ser el rango de (0 - 60 A), ponemos como constante 6. En el canal 3 hemos conectado la sonda voltimétrica con una escala de x20, así pues colocamos una constante de 20. Para el canal 4 (intensidad de la pinza amperimétrica) se aplica una constante de 100, debido a que usamos la pinza en la posición 100mV/A.



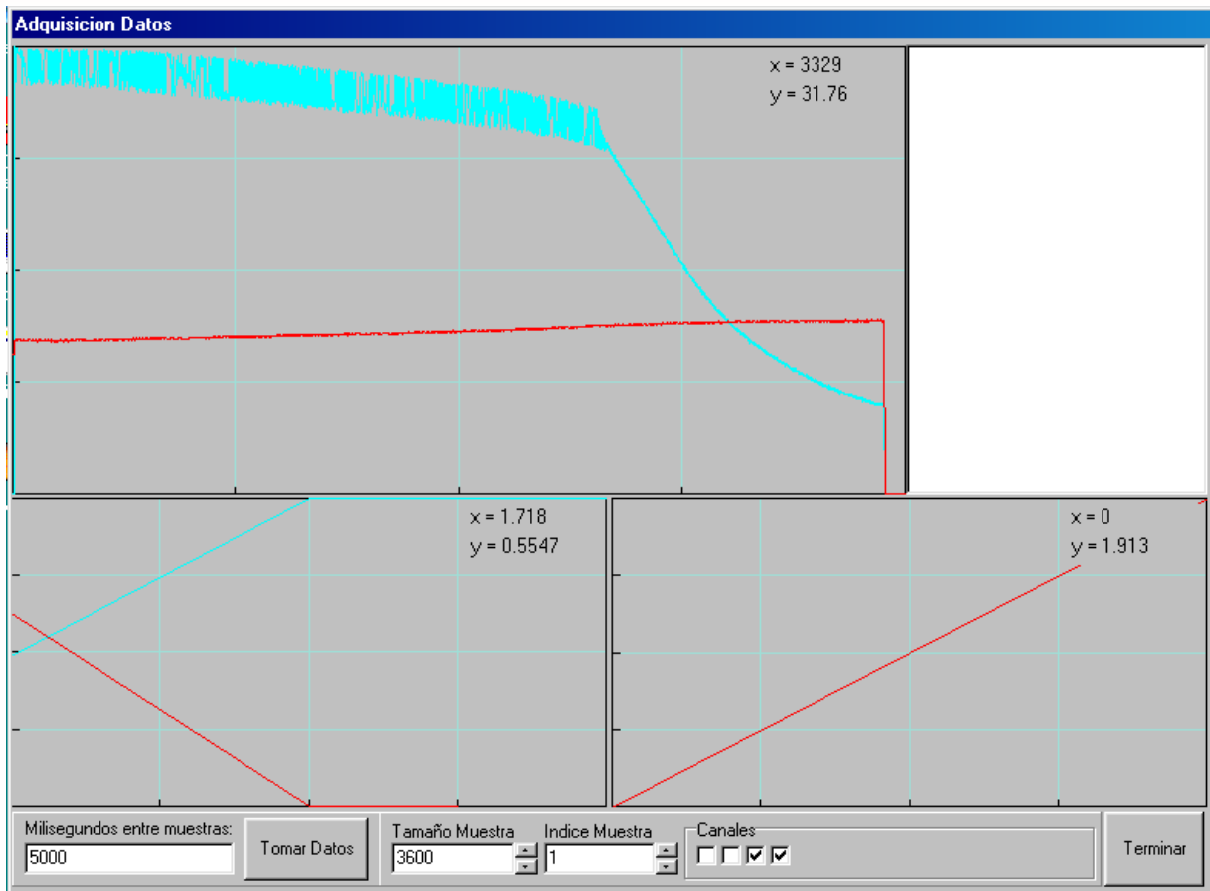
Finalmente, para medir datos, pinchamos en daq.exe y nos aparecerá la siguiente pantalla

Cte's	Canal 0	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Ca
A*	15	6	20.1314	100	1	1	1	1	1	10
+ B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Adquisición de datos

- Parámetros de Adquisición: hemos establecido la Frecuencia de muestreo en 2 Hz, esto quiere decir que en cada segundo de nuestro ensayo tomaremos 2 muestras o puntos. Como tenemos 4 canales de medida indicamos como canal bajo: 0, y como canal alto: 3.
- Pinchamos en donde dice “muestras/canal”.
- Guardar Datos: elegimos guardar datos en fichero con el nombre deseado. Como vemos en la figura nos aparecen las constantes de conversión.

Pinchamos en OK y entramos en



Pantalla de Toma de datos

- Pondremos un número en milisegundos entre muestras para asegurarnos que tenemos datos que representen nuestro ensayo, por ejemplo el ensayo de carga de la batería de la fotografía se ha realizado con muestras cada 5 segundos.

- Pincharemos en Tomar Datos justo en el momento en el que empiece nuestro ensayo.

- Cuando termine el ensayo, se irá representando el resultado y si queremos tener una resolución diferente de los datos, cambiamos los valores en donde dice “tamaño de la muestra”. El programa también nos permite visualizar el canal deseado.

- Finalmente pincharemos en Terminar de modo que se nos creará un archivo con el nombre especificado anteriormente en la carpeta Datos medidos.

Una vez finalizado el proceso de toma de datos, viene el proceso de tratamiento de los datos.



3.2 Ensayos de descarga

En este apartado nos centraremos en explicar los ensayos de descarga de la batería que se han realizado para este PFC. Para lo cual dividiremos la información en dos apartados, en el primero de ellos hablaremos de los tipos de descarga y de la nomenclatura para referirnos a las descargas, y en el segundo apartado hablaremos de los ensayos que hemos realizado con el fin de validar nuestro modelo implementado en simulink (MATLAB).

Nota: Todas las gráficas de este PFC serán en unidades del sistema internacional, con el tiempo (segundos) en el eje X.

a) Tipos de descarga y nomenclatura.

Para realizar este PFC se han realizado descargas a intensidad constante, gracias a las facilidades que nos da la carga electrónica programable. Al igual que en los artículos, luego se simularán estas descargas a intensidad constante para validar el modelo.

Hemos descargado la batería según las recomendaciones del fabricante para la tensión final de descarga, según el tipo de descarga. Las descargas a intensidad constante se clasifican de acuerdo con la siguiente nomenclatura que podemos ver en la hoja de características técnicas de la batería:

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,80 V	C5 (Ah) 1,78V	C3 (Ah) 1,77 V	C1 (Ah) 1,71V
12V 1 OPzS 50	272	205	388	36,6	73	60	45	39	29
12V 2 OPzS 100	272	205	388	53,3	146	105	90	78	58
12V 3 OPzS 150	380	205	388	76,2	218	158	135	117	87
12V 4 OPzS 200	272	205	388	48,5	291	210	180	156	116
12V 5 OPzS 250	380	205	388	65,3	364	263	225	195	145
12V 6 OPzS 300	380	205	388	72,8	437	315	270	234	174

DESCARGA C1, significa que la batería se descarga en 1 hora, según el fabricante lo hace a una intensidad de 87Amp. Teniendo la batería una capacidad de 87Ah, con una tensión final de descarga de 1,71v por celda.

DESCARGA C3, significa que la batería se descarga en 3 horas, según el fabricante lo hace a una intensidad de 39Amp. Teniendo la batería una capacidad de 117Ah, con una tensión final de descarga de 1,77v por celda.

DESCARGA C5, significa que la batería se descarga en 5 horas, según el fabricante lo hace a una intensidad de 27Amp. Teniendo la batería una capacidad de 135Ah, con una tensión final de descarga de 1,78v por celda.

DESCARGA C10, significa que la batería se descarga en 10 horas, según el fabricante lo hace a una intensidad de 15,8Amp. Teniendo la batería una capacidad de 158Ah, con una tensión final de descarga de 1,8v por celda.



DESCARGA C100, significa que la batería se descarga en 100 horas, según el fabricante lo hace a una intensidad de 2,18Amp. Teniendo la batería una capacidad de 218Ah, con una tensión final de descarga de 1,85v por celda.

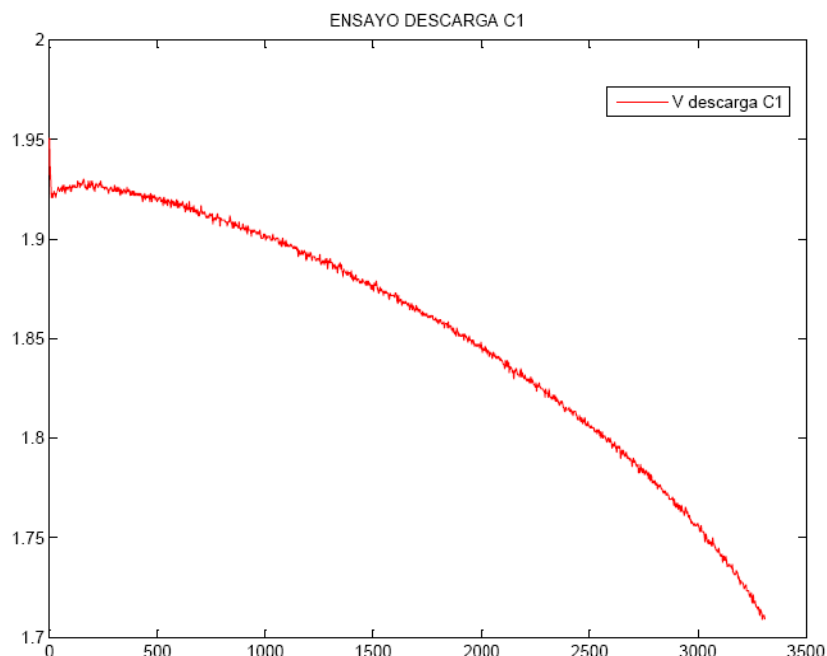
Todos estos datos anteriormente explicados son dados por el fabricante de la batería, este ha tomado como temperatura nominal 20°C. Hemos intentado reproducir estas descargas que da el fabricante, pero cuando procedemos a descargar la batería a esas intensidades no podemos extraer la carga eléctrica que el fabricante dice que le podemos extraer. Esto es debido a que la temperatura de los ensayos de este PFC es de 26°C aproximadamente, por lo tanto varía la capacidad de la batería con respecto a la dada por el fabricante.

b) Ensayos de descarga realizados.

Para validar el modelo implementado en simulink hemos realizado dos tandas de ensayos. Hay que aclarar que durante las descargas prácticamente no se apreciaban variaciones de temperatura del electrolito, apenas un par de °C o menos.

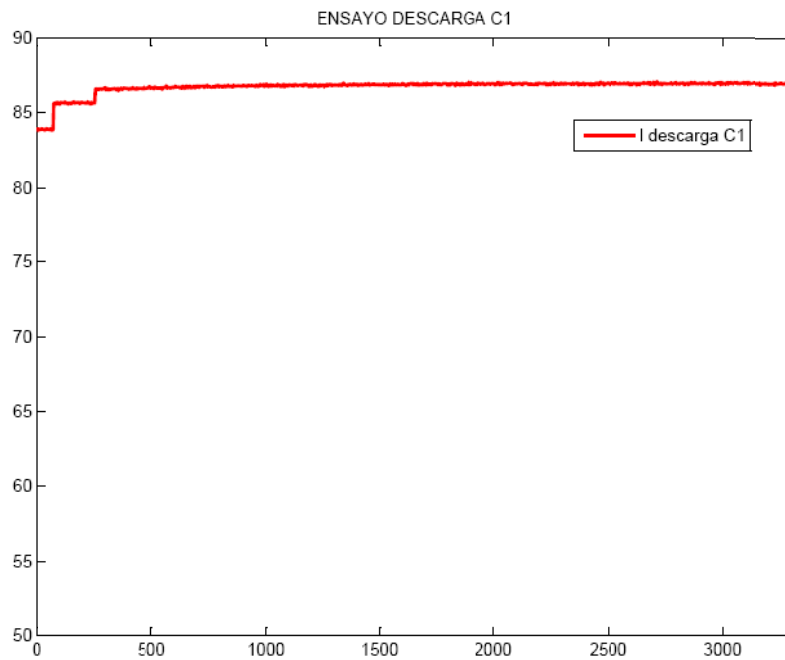
- En la primera tanda se han realizado las descargas definidas anteriormente (C1, C3, C5, C10 y C100), aunque no se han obtenido los mismos valores que los del fabricante, a continuación se añaden los resultados obtenidos:

DESCARGA C1



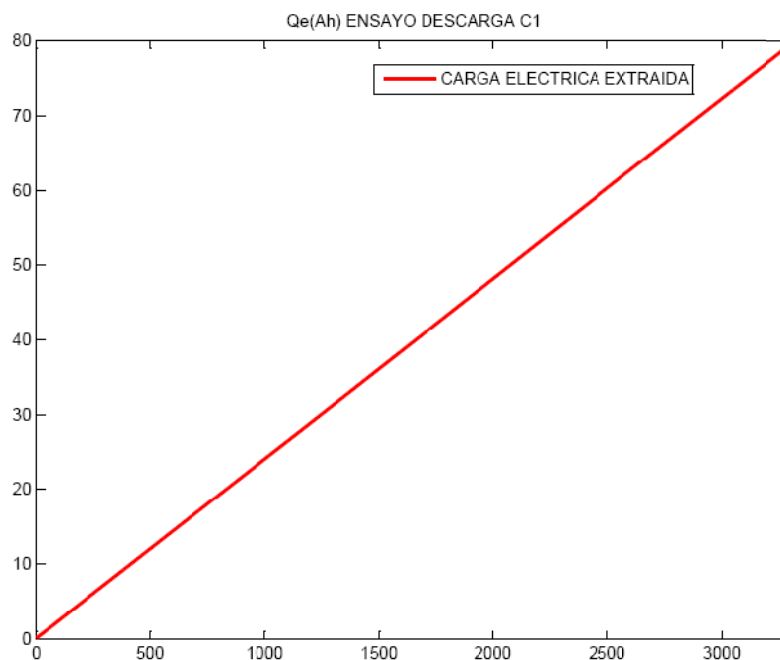
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Hay que indicar que al inicio de la descarga se produce un caída muy rápida que pocos segundos después se recupera parte de esa caída de tensión, esto solo sucede con este ensayo debido a la respuesta de la batería ante un descarga de gran intensidad.



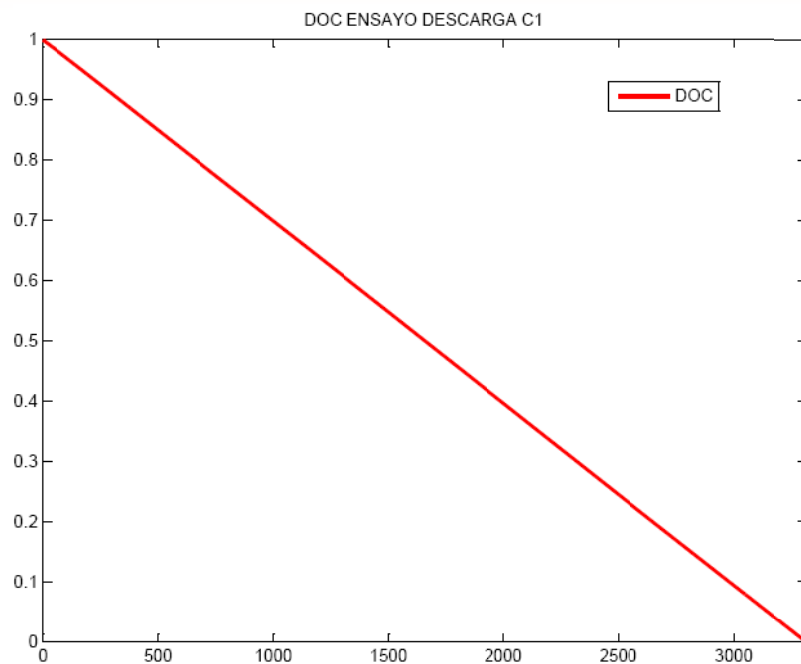
Variación de la intensidad en función del tiempo

Los pequeños escalones del principio se deben a que programamos la carga a 87A (utilizando los dos módulos), pero esta comete un error a esa intensidad tan alta, por eso luego se aumento hasta los 90A para que en realidad la descarga fuese a 87A aproximadamente (módulo 1 a 41 amp y módulo dos a 49 amp).



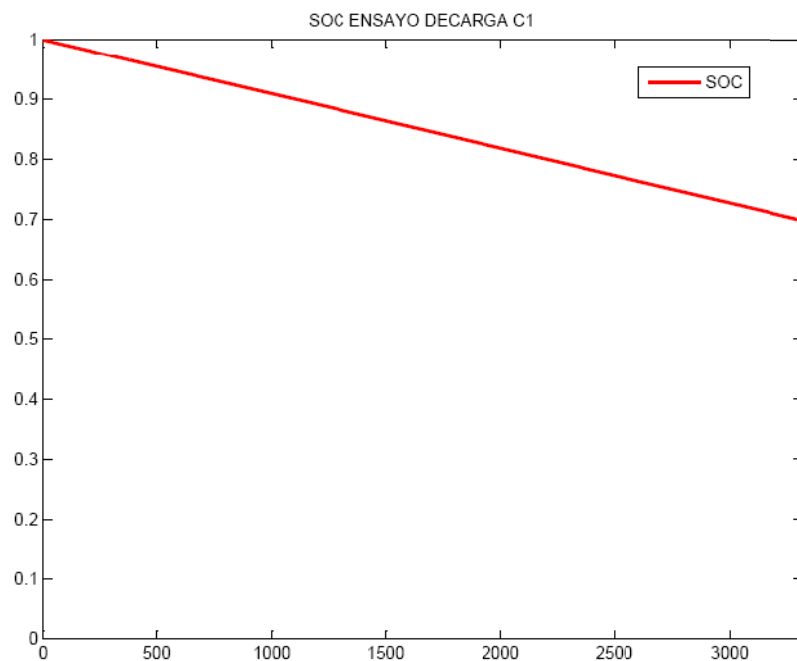
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.

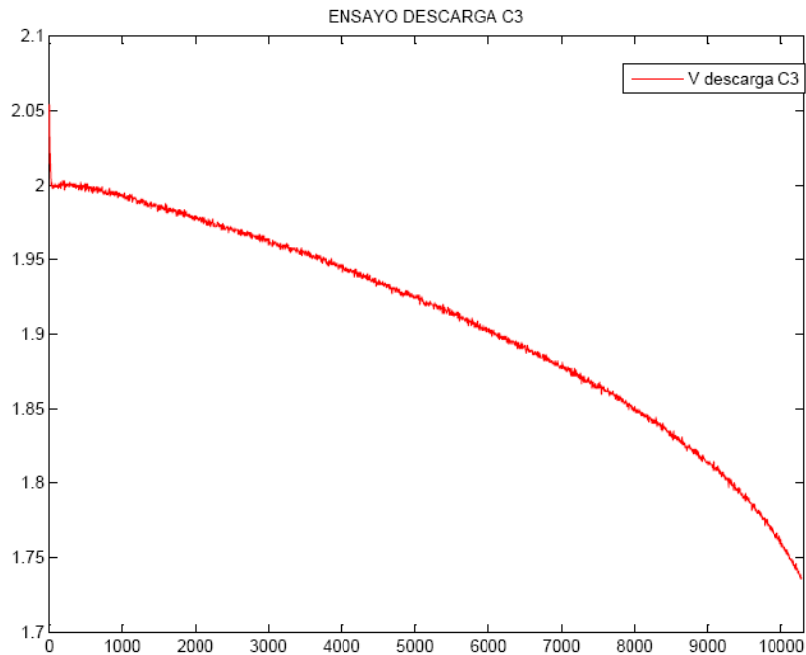


Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 70% de su capacidad máxima.

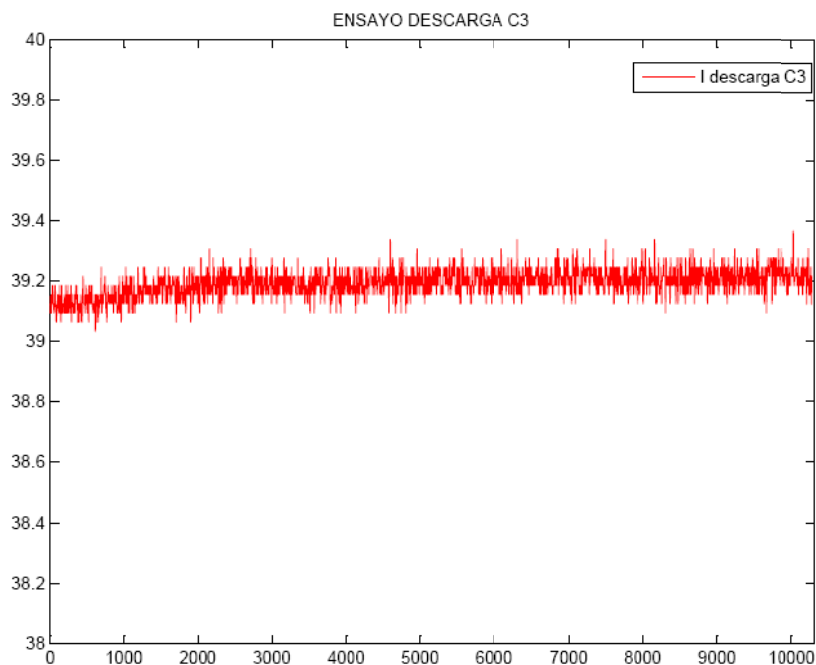


DESCARGA C3



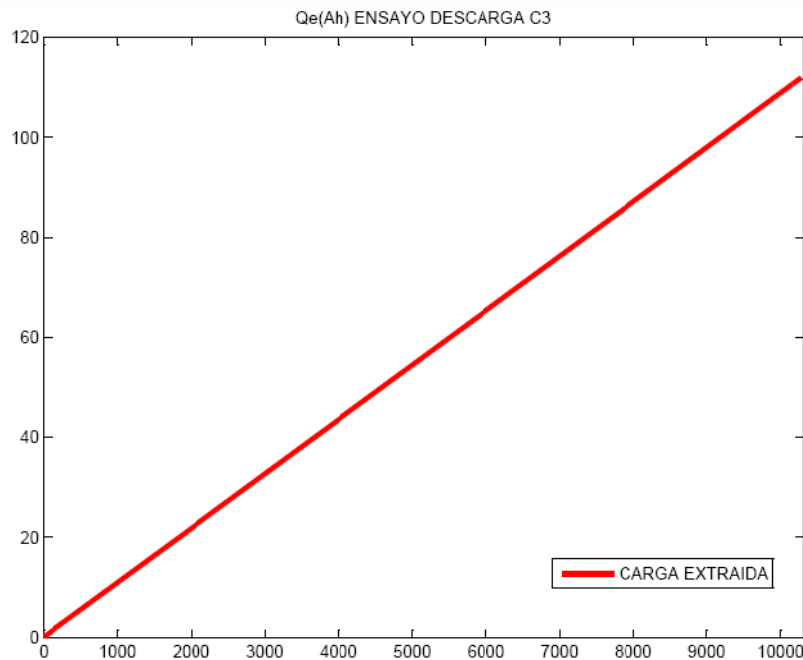
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Como podemos apreciar a esta intensidad ya no se produce el pico inicial que podíamos ver en la descarga C1, esto es debido a las características de la batería, que soporta con facilidad los 39A de esta descarga.



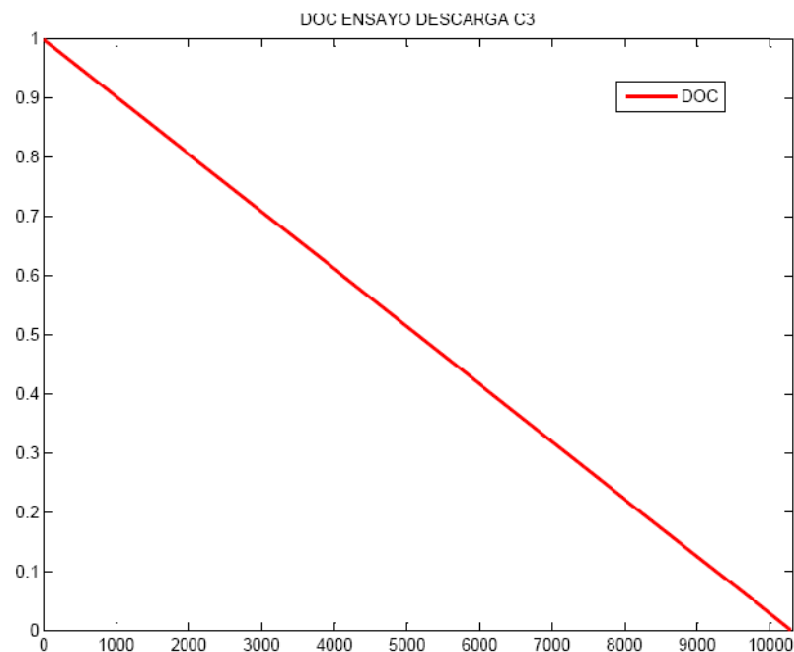
Variación de la intensidad en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como la intensidad fluctúa, pero se mantiene en torno a los 39,2A, en los primeros 1000 segundos se aprecia que la intensidad es algo menor. Para esta descarga hemos programado la carga electrónica a 39A.



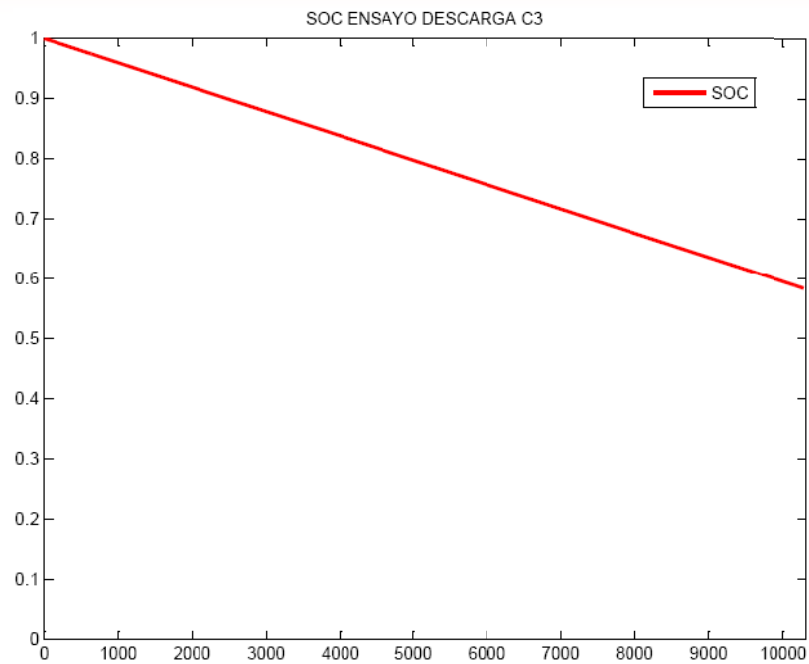
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.

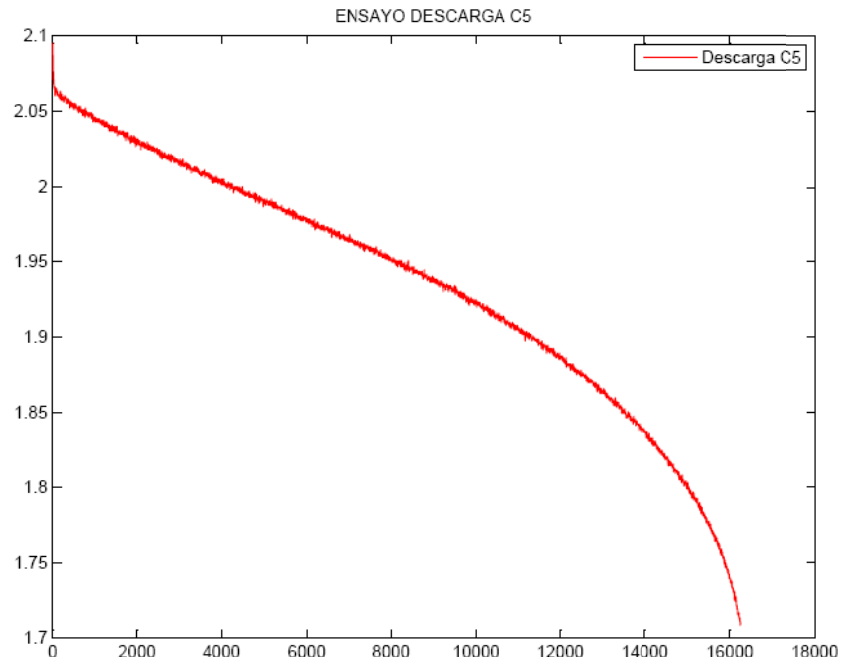


Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 58% de su capacidad máxima.

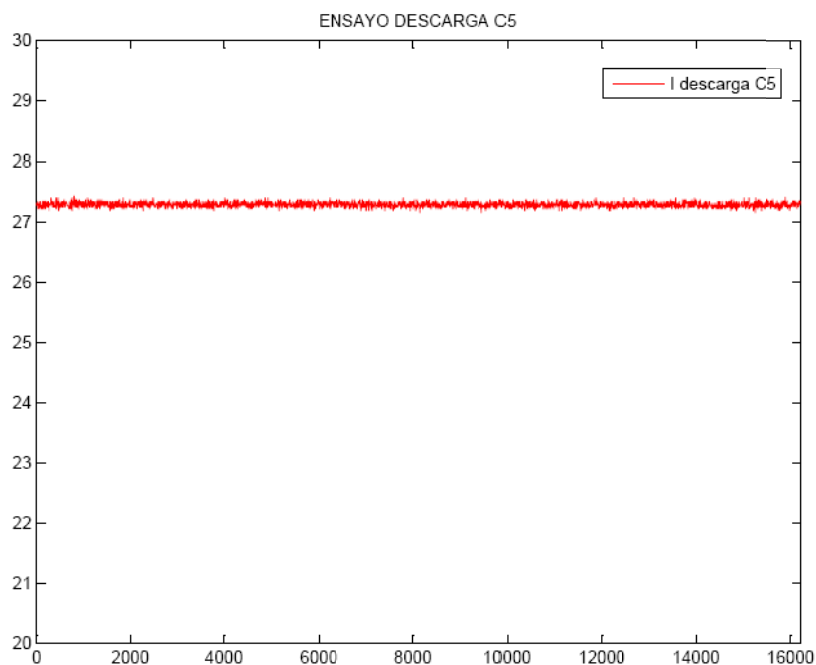


DESCARGA C5



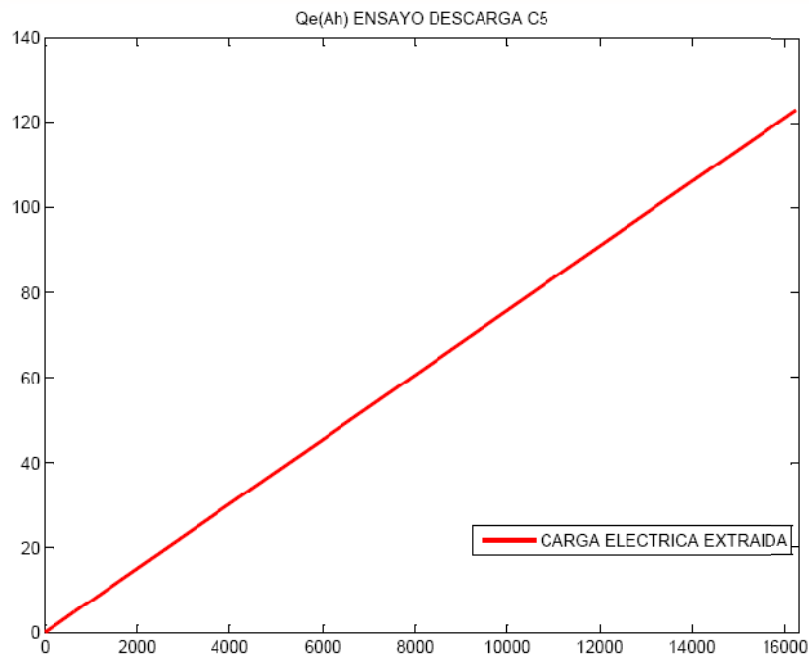
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

No tenemos nada que comentar solo que la batería se descarga completamente en 16250 segundos, las tomas entre muestras de este ensayo se han tomado cada 5 segundos.



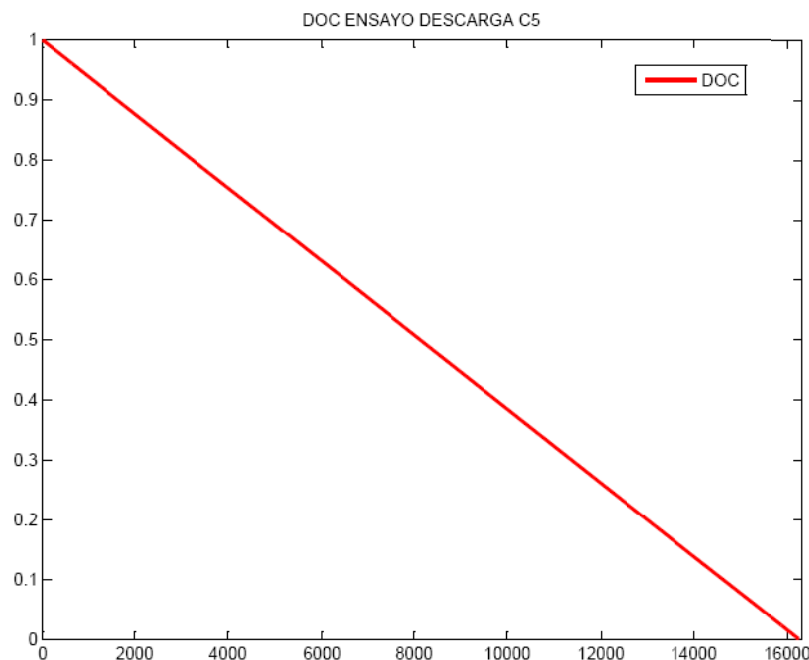
Variación de la intensidad en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como la intensidad fluctúa muy poco, y se mantiene en torno a 27,2A. Para esta descarga hemos programado la carga electrónica a 27A.



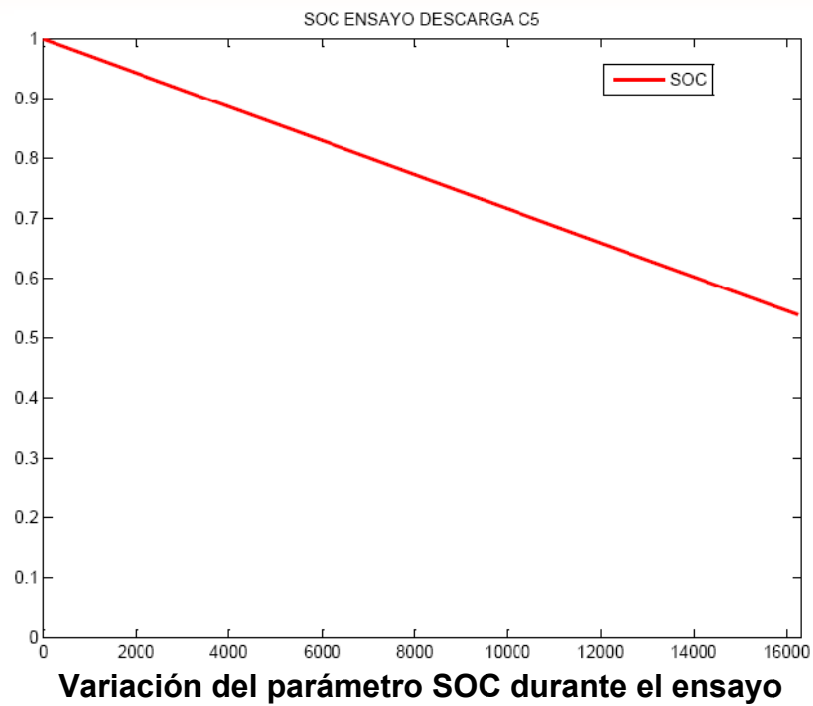
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

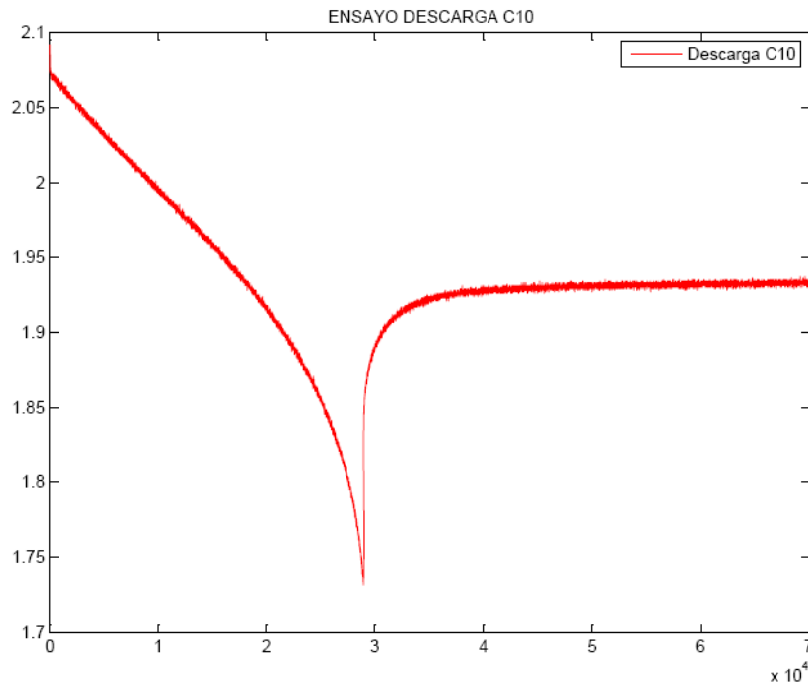
Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 54% de su capacidad máxima.

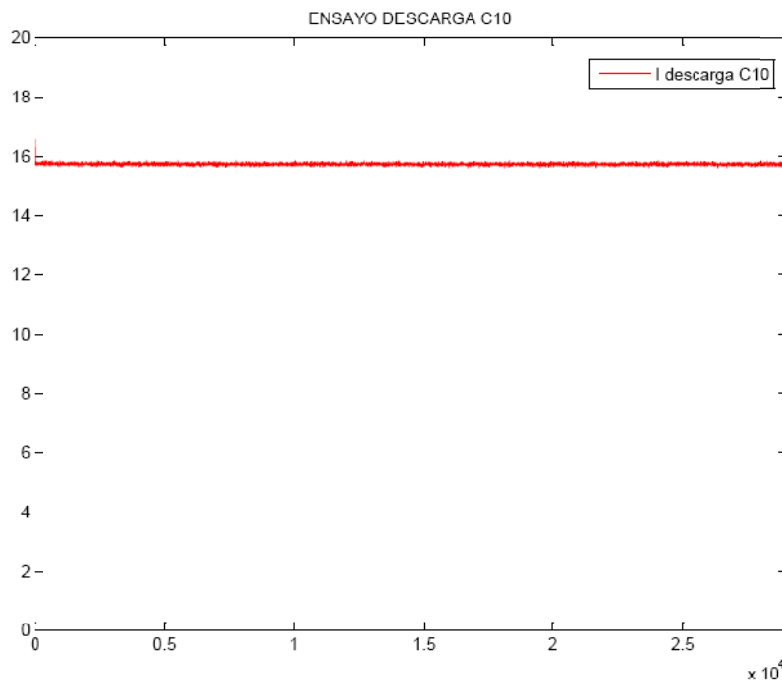


DESCARGA C10



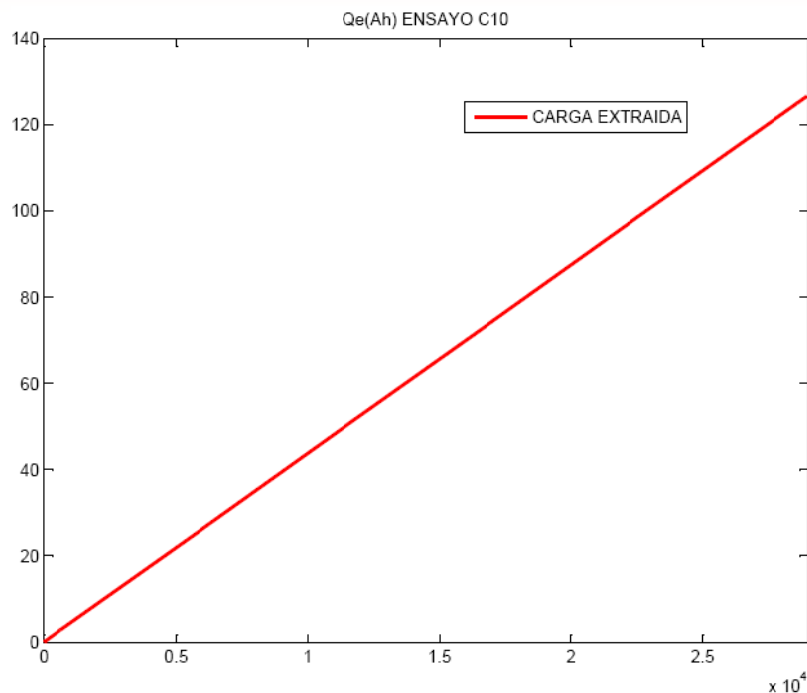
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En este ensayo hemos dejado conectada la sonda voltimétrica después de terminar la descarga, así registramos como se produce la recuperación de la tensión de la batería. Esta descarga ha durado 28960 segundos, muestras cada 5 seg.



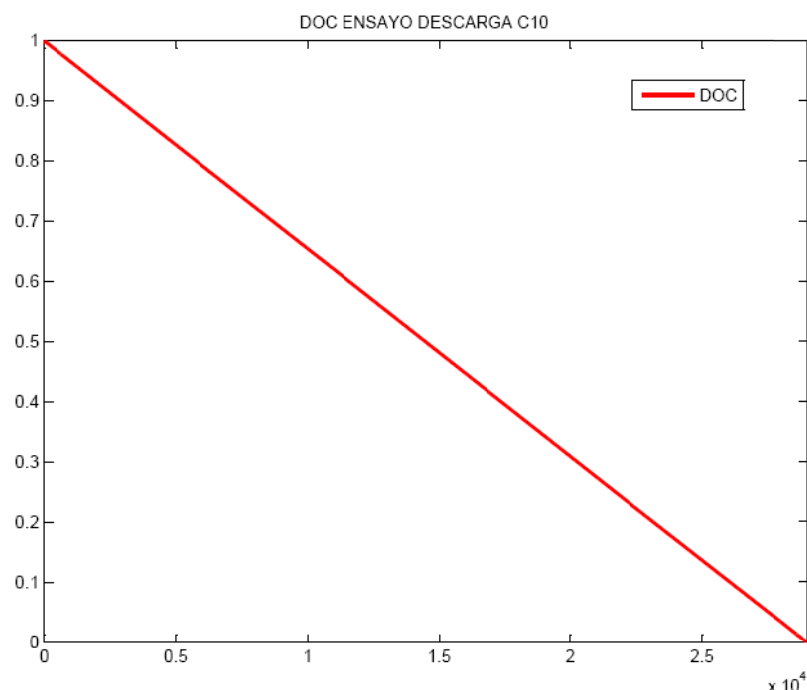
Variación de la intensidad en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como la intensidad se mantiene en torno a los 15,8^a durante todo el ensayo.



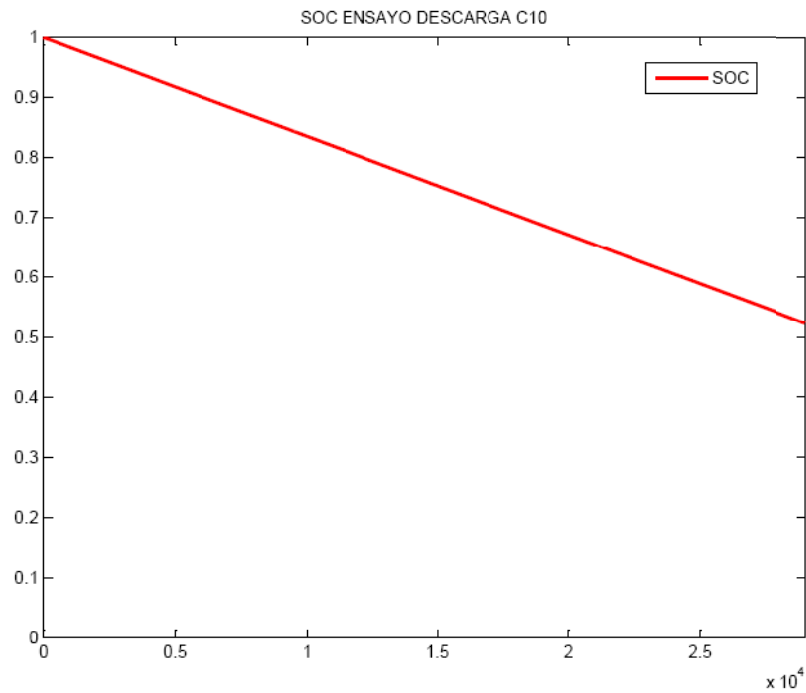
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.

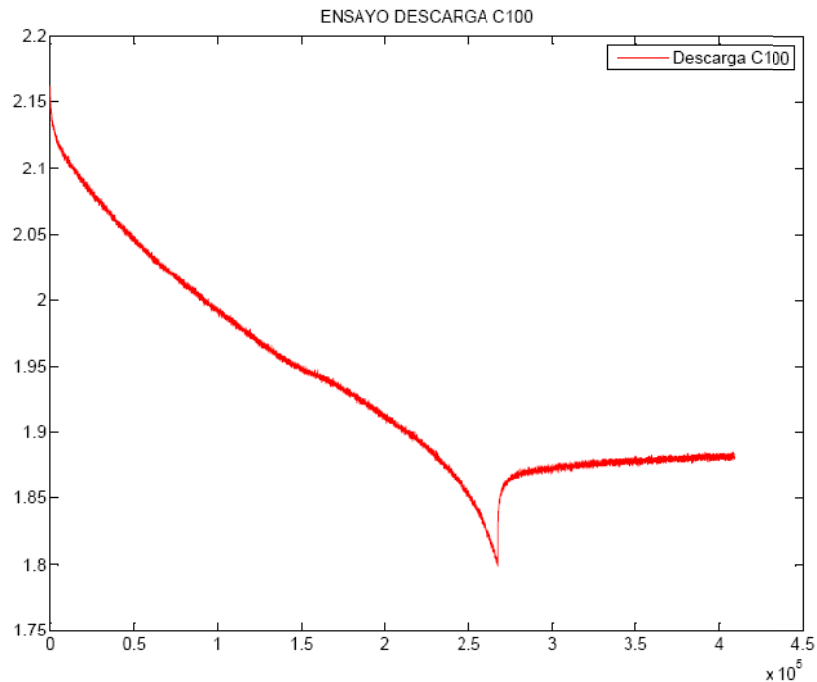


Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 52% de su capacidad máxima.

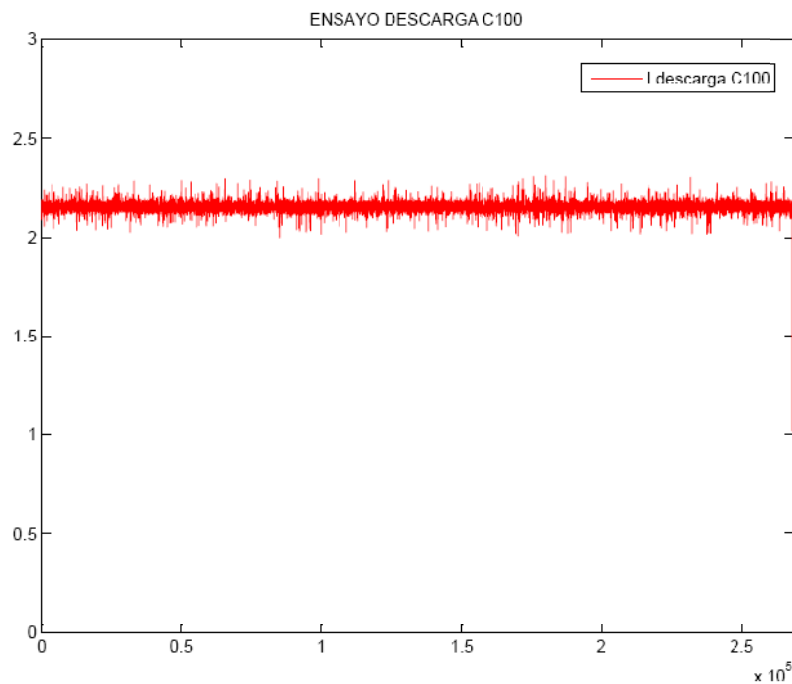


DESCARGA C100



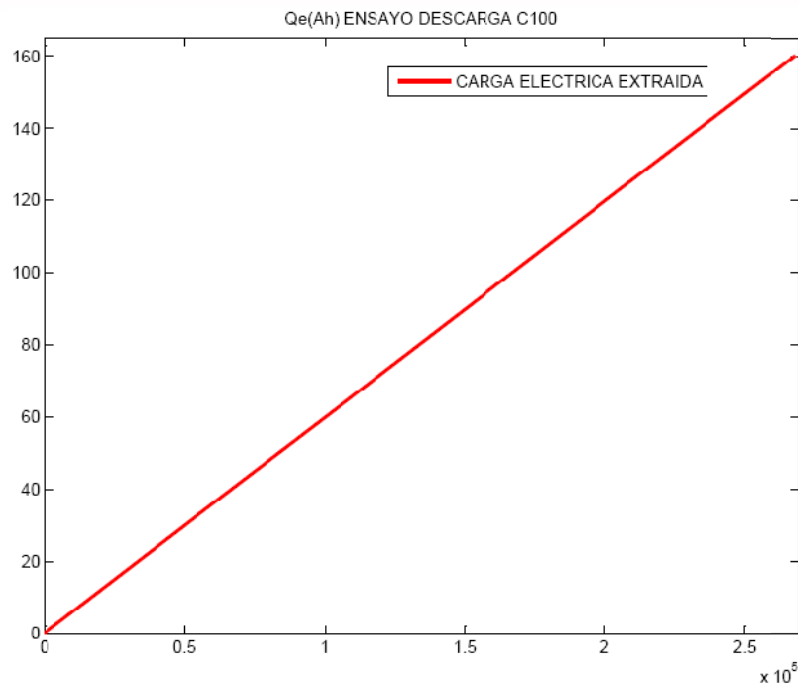
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En este ensayo hemos registrado la tensión después de la descarga, durante la descarga se aprecia que la tensión hace un cambio de curvatura, esto hace que se aleje nuestra simulación de lo real, como podremos ver en el punto 4.



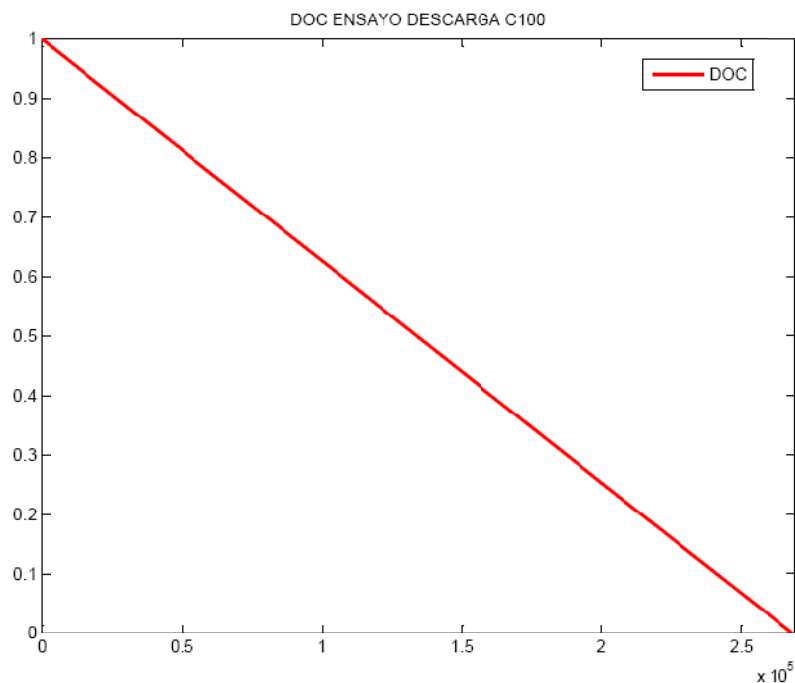
Variación de la intensidad en función del tiempo

Vemos que la intensidad se mantiene en torno a 2,2A , pero constante durante todo el ensayo, que tarda 268020 segundos con muestras cada 30 segundos.



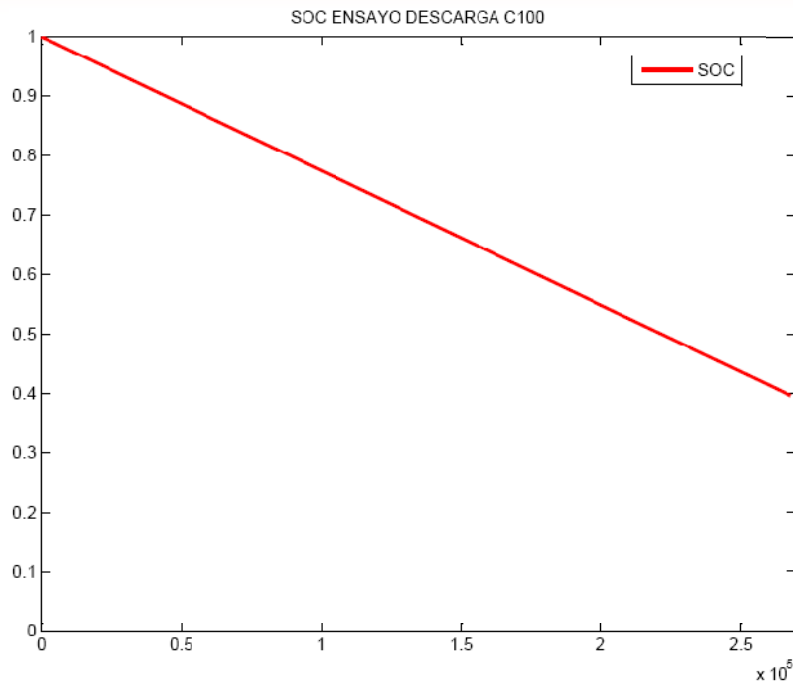
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



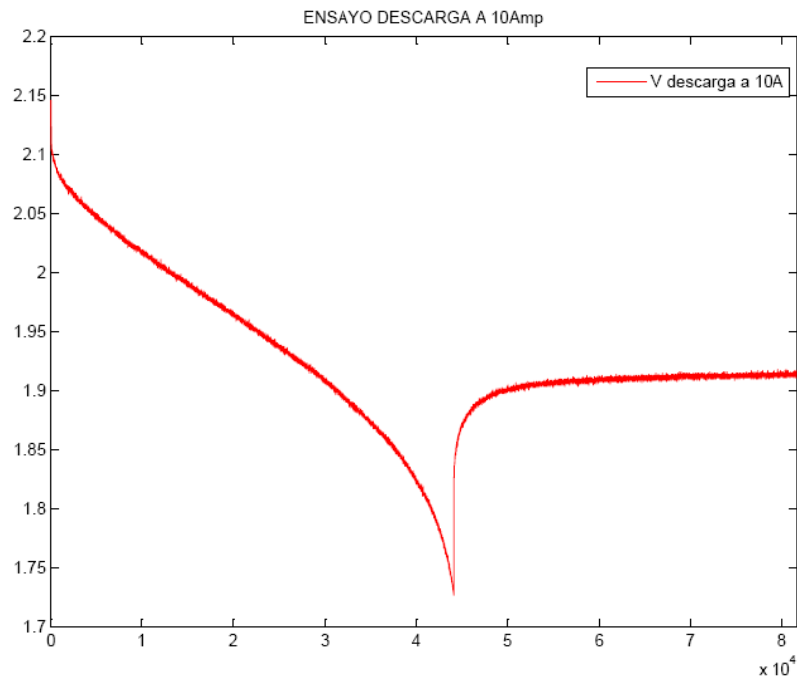
Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 40% de su capacidad máxima.

- **En la segunda tanda** se han realizado dos descargas, una a 10 A y otra a 20 A, con el fin de obtener un ajuste más fino del modelo entorno a la intensidad nominal de la batería ($I_n=15,8$ A) que equivale a la descarga C10. A continuación se añaden los resultados obtenidos:

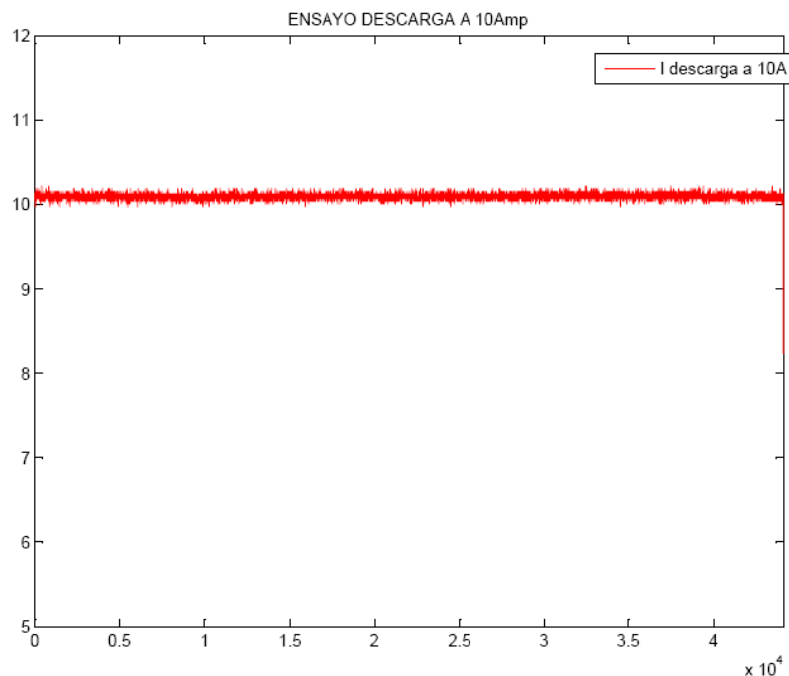


DESCARGA 10 AMP



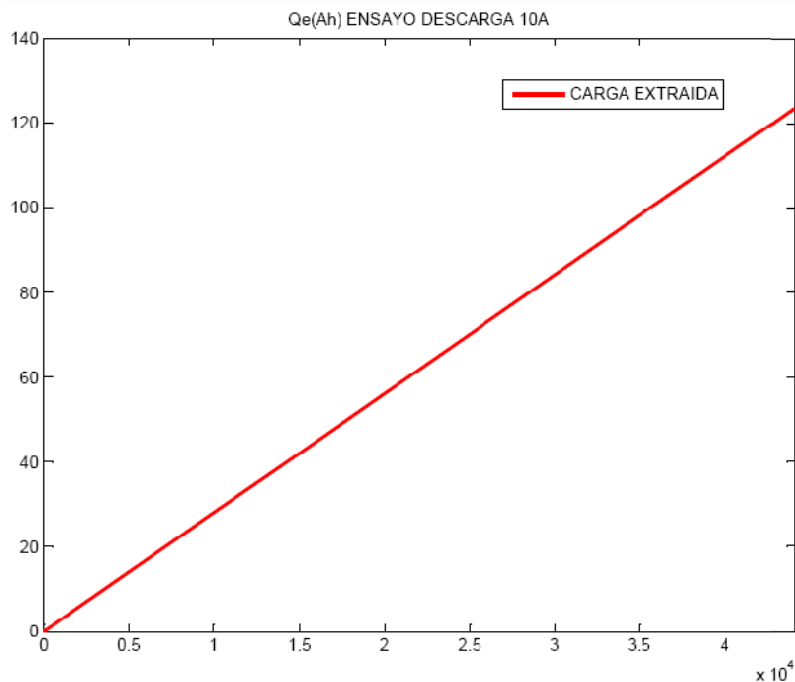
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En este ensayo hemos registrado la tensión después de la descarga, el ensayo dura 44055 segundos y se toman muestras cada 5 segundos.



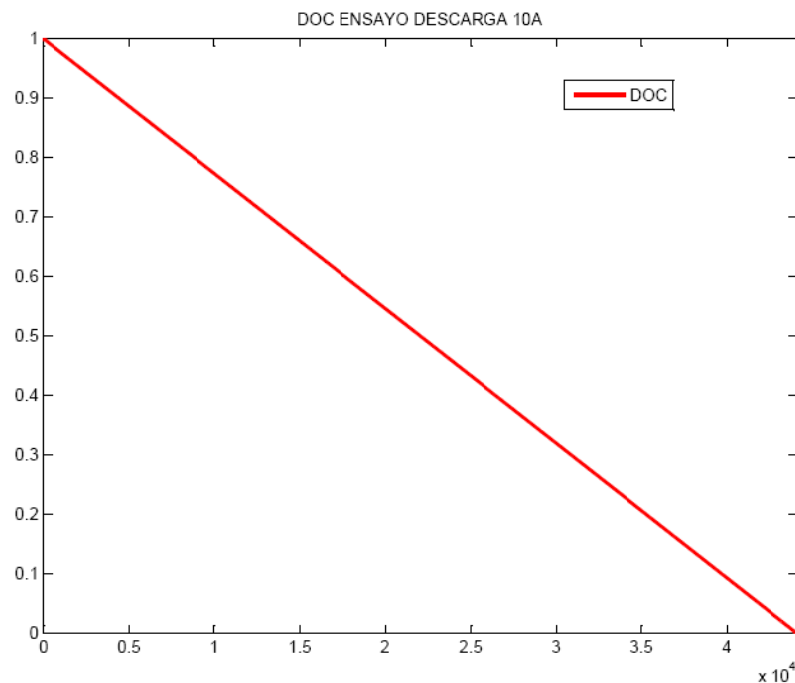
Variación de la intensidad en función del tiempo

Vemos que la intensidad se mantiene en torno a 10,1A, pero constante durante todo el ensayo.



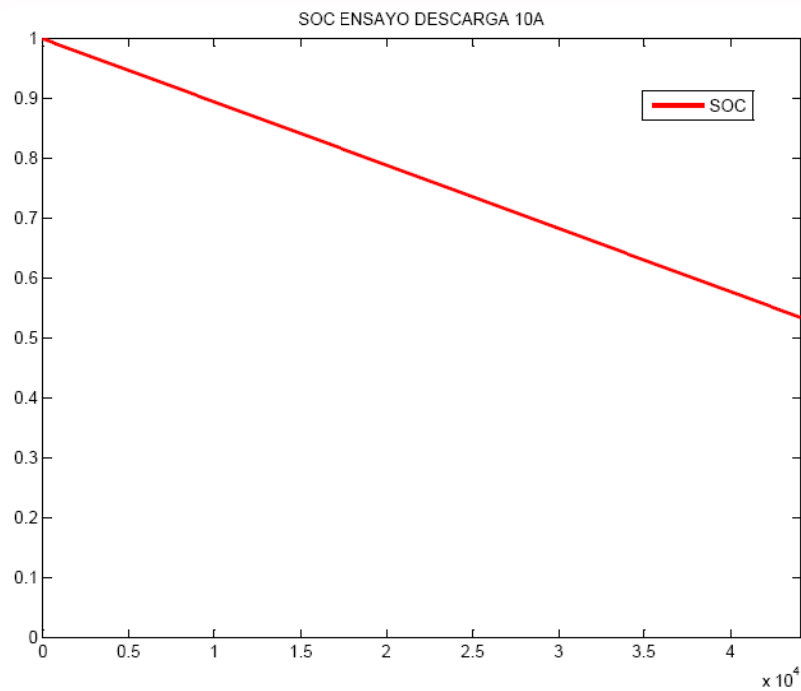
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.

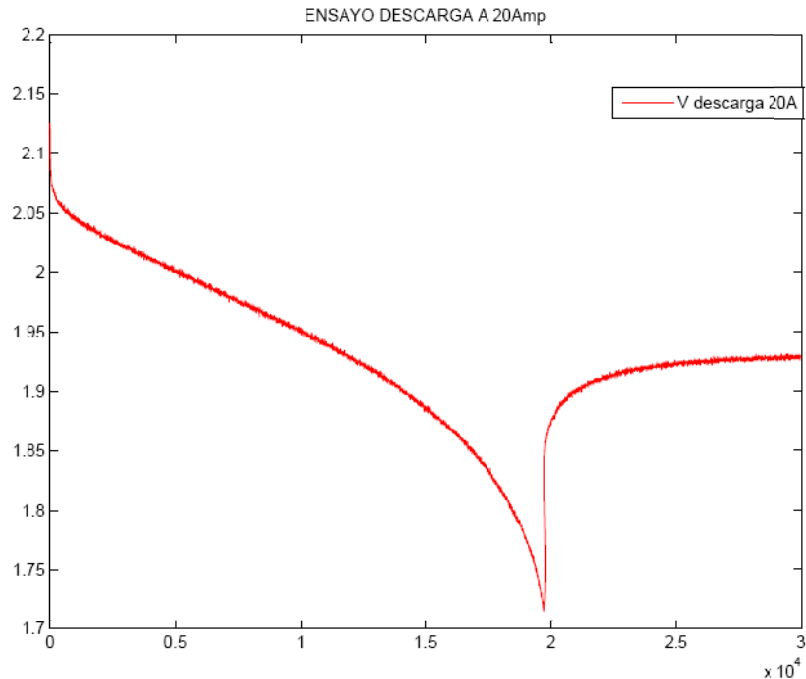


Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 54% de su capacidad máxima.

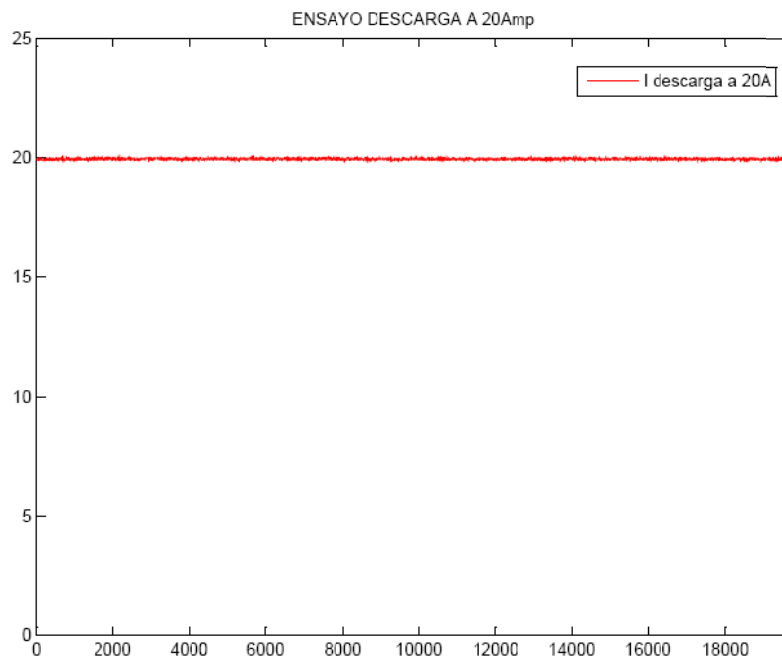


DESCARGA 20 AMP



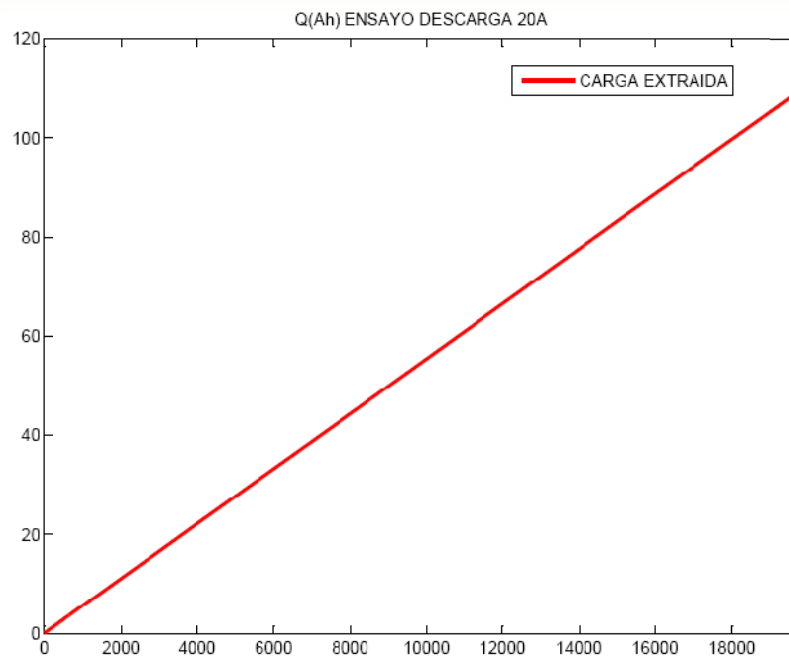
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En este ensayo hemos registrado la tensión después de la descarga, el ensayo dura 19735 segundos y se toman muestras cada 5 segundos.



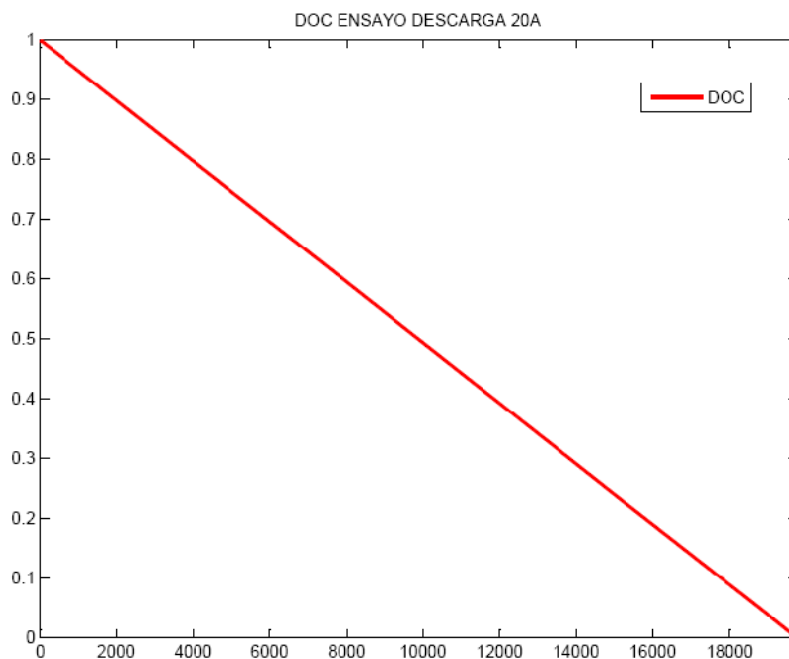
Variación de la intensidad en función del tiempo

Vemos que la intensidad se mantiene en torno a 20A, pero constante durante todo el ensayo, destacar que en este caso la intensidad registrada por la pinza amperimétrica es igual que la programada en la carga electrónica.



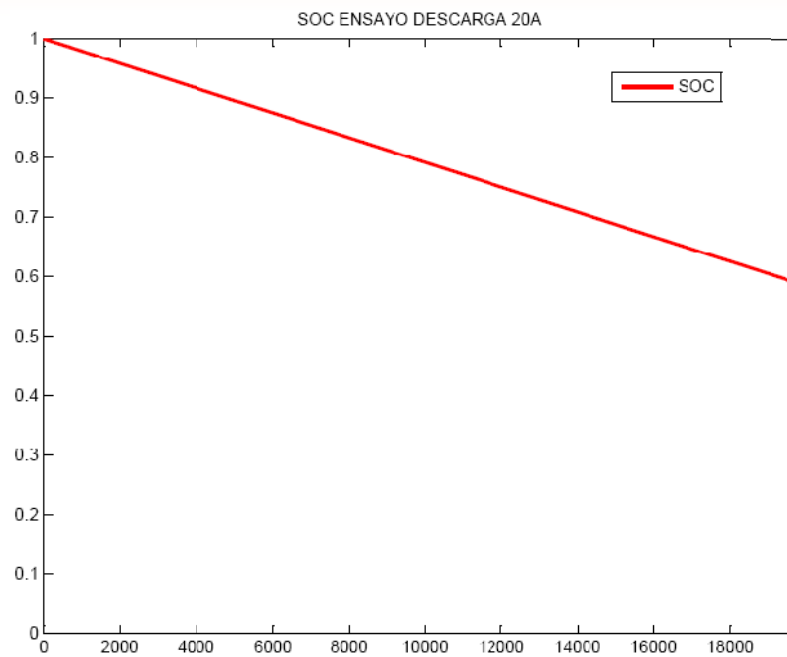
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ al final del ensayo. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 59% de su capacidad máxima.



c) **Tabla resumen - datos más importantes de los ensayos.**

Después de realizar los ensayos, hemos trabajado con los datos de tensión e intensidad obtenidos, llegando así a las curvas anteriores de Qe, DOC y SOC.

A continuación a modo de resumen de todos los cálculos que se han hecho, se añade una tabla con el fin de tener condensados los datos más importantes de los ensayos, estos datos los utilizaremos para meterlos en nuestro modelo de simulink.

En concreto utilizaremos el valor de $C(I, \theta)$, es decir la carga eléctrica extraída en el ensayo, que representa la capacidad de la batería a esa I_d (intensidad de descarga) y una determinada temperatura. También utilizaremos el valor del tiempo del ensayo T , así como la intensidad media de descarga I_d . Para el cálculo de I_d hemos hecho la media de la intensidad registrada por la carga, también la media de la intensidad registrada por la pinza amperimétrica, y luego hemos hecho la media de ambos valores, obteniendo así un valor lo más representativo posible de la descarga.

Para las graficas de intensidad se ha utilizado la intensidad registrada por la pinza amperimétrica, es por este motivo que en las gráficas de intensidad de los ensayos algunas veces la I_d es algo mayor que la de la tabla, porque la pinza registraba valores por encima del real y la carga por debajo.

DESCARGA	TIEMPO (T) segundos	INTENSIDAD (I_d) amperios	$C(I, \theta)$ amperios-hora
C1	3309	86,684	79,7493
C3	10280	39,0316	111,9696
C5	16250	27,0868	123,2329
C10	28960	15,7365	126,7222
C100	268020	2,1851	160,3446
10 A	44055	10,1011	123,6124
20 A	19735	19,9443	109,3613



3.3 Ensayos de carga

a) Introducción a la carga de la batería

Ahora procedemos a explicar qué tipo de carga de la batería se ha llevado a cabo, con los medios que disponemos en el laboratorio de I+D.

En los artículos se hacen comparaciones de los modelos con cargas a intensidad constante, pero como el cargador del que disponemos no nos permite hacer una carga de la batería a intensidad constante nos hemos conformado con realizar la cargas a intensidad y tensión variable, y luego a la hora de simular la carga metemos como intensidad de carga la registrada durante dicha carga.

Aunque hemos realizado muchas cargas de la batería solo hemos estudiado una de estas, porque son todas iguales.

Hay que destacar que el fabricante da una serie de restricciones en cuanto a intensidades y tensiones durante la carga de la batería (consultar ANEXO IV). En concreto en nuestros ensayos hemos cargado la batería hasta que su tensión entre bornes era de 14,4v, es decir 2,4v por celda, no habiendo límite para la corriente de carga si no pasamos esos valores de tensión.

b) Ensayo de carga estudiado.

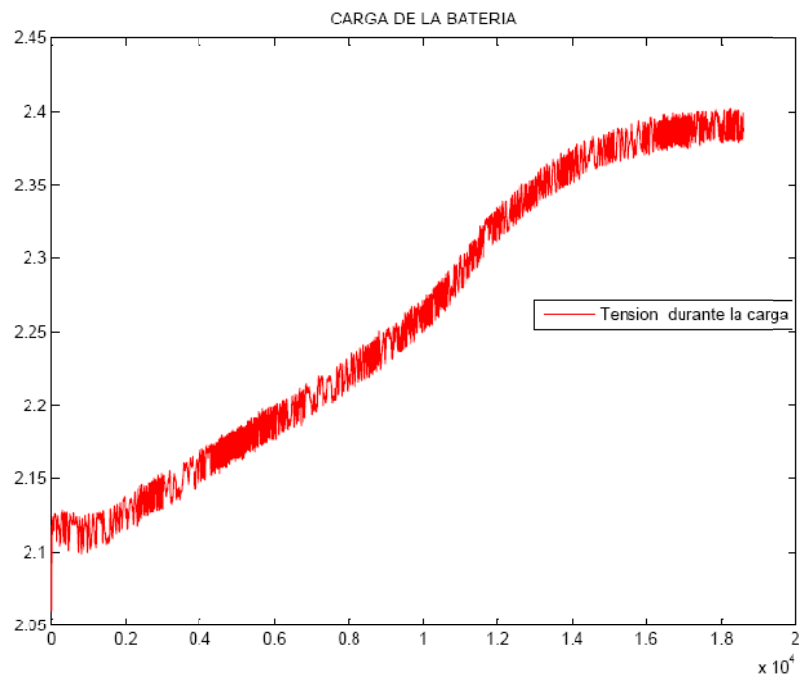
Ahora procederemos a detallar el ensayo de carga que hemos estudiado, en concreto es el que hemos realizado después de haber descargado la batería con una descarga del tipo C10, representaremos en gráficas los parámetros más representativos de dicho ensayo.

En cuanto a la temperatura del electrolito se registraron los siguientes valores:

VARIABLE	INICIO DEL ENSAYO	A 50% DEL ENSAYO	FINAL DEL ENSAYO
TEMP. (°C)	24	26	29

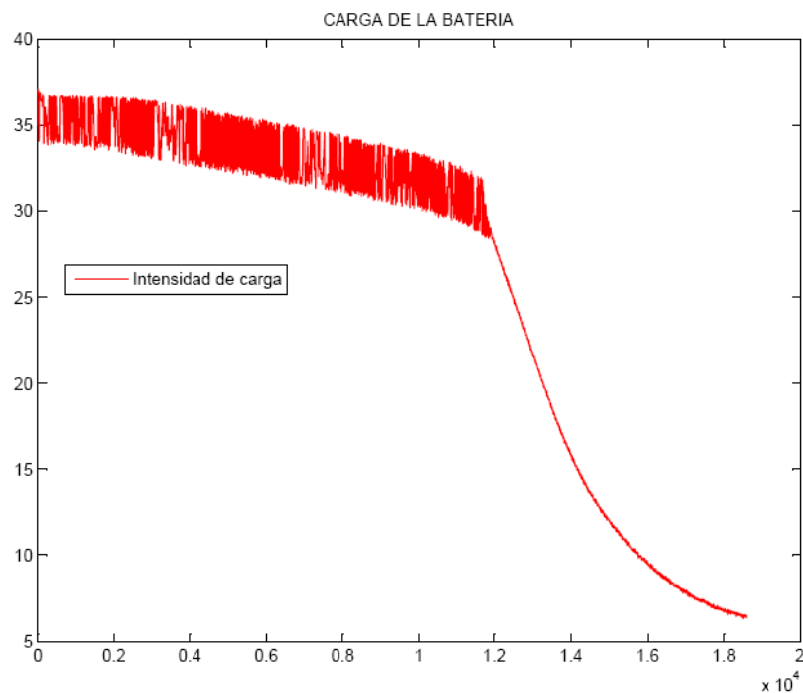


ENSAYO DE CARGA



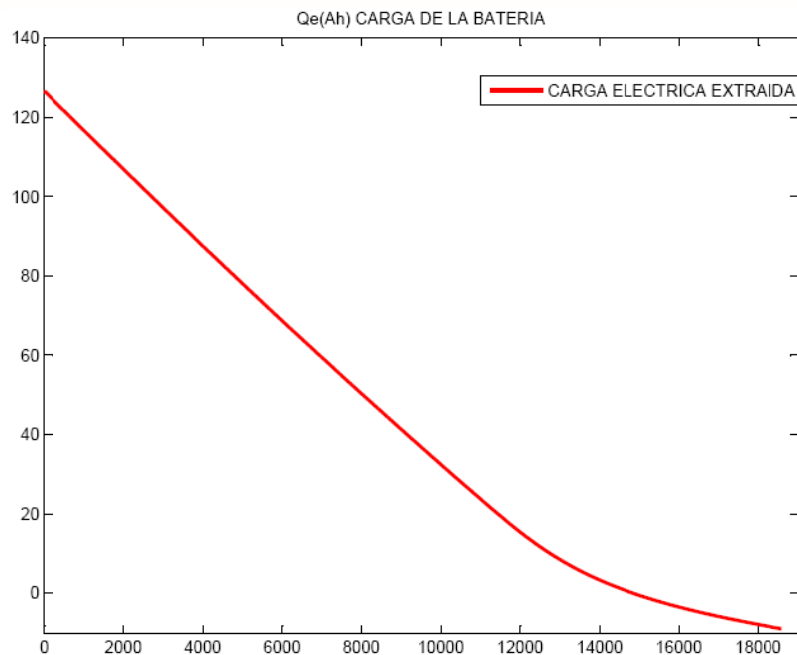
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Aquí podemos observar de que manera aumenta la tensión de la batería en el ensayo de carga, una vez que se llega a la tensión de gaseamiento del electrolito (2,4 v) se deja de cargar la batería.



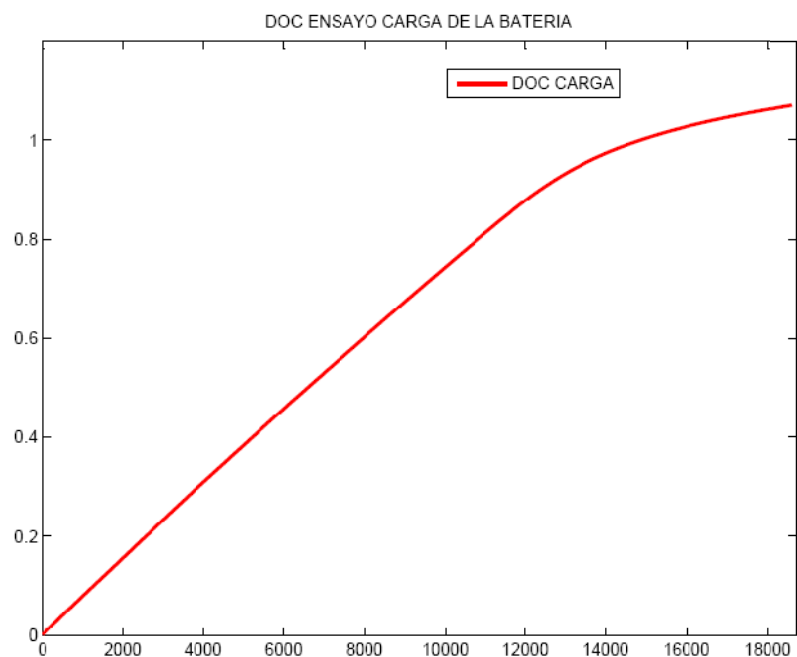
Variación de la intensidad en función del tiempo

En esta gráfica vemos como al principio (primeros 12000 seg.), la batería se carga con una corriente de entre 30 y 35 A, y luego va disminuyendo conforme la batería se va llenando de carga hasta un valor de 6,4 A al final del ensayo de carga.



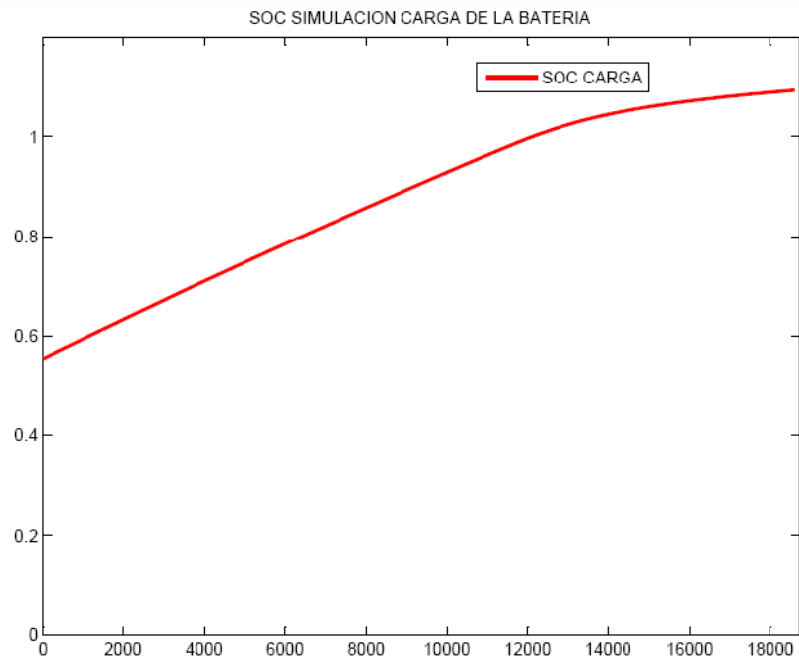
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Ahora a diferencia de las descargas de la batería observamos que el comportamiento de la Q_e no es lineal, esto es debido a que la corriente no es constante, al disminuir al final del ensayo también disminuye la pendiente de la Q_e .



Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como observamos en esta gráfica DOC vale más de 100% al final del ensayo, esto es debido a que en la descarga C10 se le extrajeron 126,7222 Ah y en la carga se le han metido 135,693 Ah. DOC no es lineal, sucede lo mismo que con Q_e .



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

Este parámetro comienza valiendo 0,5544, que es donde había quedado en el ensayo C10. A este parámetro le sucede lo mismo que a los anteriores como la carga que le metemos es mayor que la que le extraímos en C10, este parámetro toma un valor mayor que la unidad al final del ensayo.



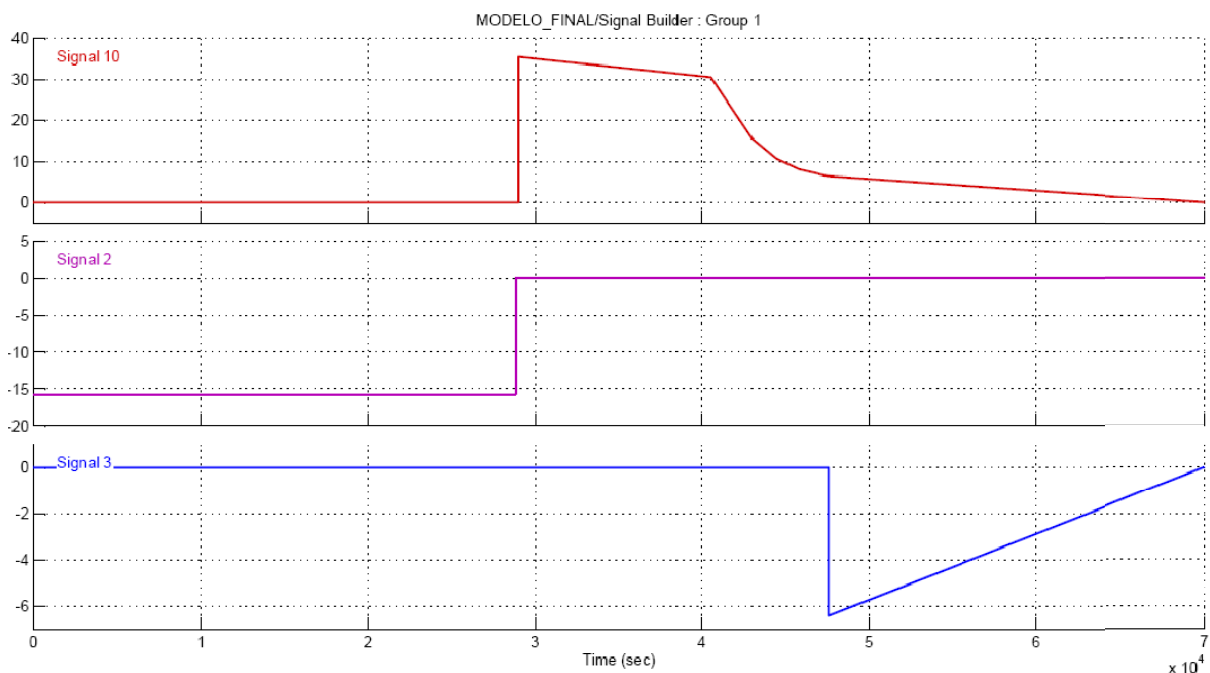
c) Tabla resumen - datos más importantes del ensayo de carga

Después de realizar este ensayo, hemos trabajado con los datos de tensión e intensidad obtenidos, llegando así a las curvas anteriores de Qe, DOC y SOC.

A continuación a modo de resumen de todos los cálculos que se han hecho, se añade una tabla con el fin de tener condensados los datos más importantes del ensayo de carga, estos datos los utilizaremos para meterlos en nuestro modelo de simulink.

ENSAYO	TIEMPO (T) segundos	INTENSIDAD (I _d) amperios	C(I,θ) amperios-hora
CARGA	18605	VARIABLE	135,693

En cuanto a la corriente se ha utilizado una herramienta de simulink que se llama “signal builder”, con la que hemos reproducido con la mayor fidelidad posible la intensidad registrada durante la carga de la batería, se hace la suma de tres corrientes, que dan como resultado una descarga a -15,7365 A hasta el tiempo 28960 segundos, luego se reproduce la intensidad de carga hasta los 47560 segundos, se puede ver en el siguiente gráfico las tres señales sumadas.



Signal builder – señales que se han utilizado en la simulación



3.4 Obtención de parámetros de la batería

Para la obtención de los parámetros de la batería se ha partido de los valores dados para las baterías de los artículos, algunos parámetros se han interpolado a partir de los del artículo. En cuanto a los parámetros de la capacidad se ha utilizado una función de matlab que nos da como resultado el conjunto de parámetros que hacen que se ajuste la fórmula del cálculo de la capacidad a los resultados de los ensayos.

A continuación podemos ver el pequeño programa hecho con este fin:

```
% Función objetivo para ajustar los parámetros de la capacidad de la batería
% Referencias: "Dynamical Models of Lead-Acid Batteries Implementation Issues" Barsali
% y Ceraolo
% "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries" Ceraolo
% x es un vector de 4 componentes:
% x(1) = Kc
% x(2) = Co+
% x(3) = epsilon
% x(4) = delta

clear;
close all;

% A continuación se definen los valores iniciales que ajustaremos, sacados mediante
% interpolación de los parámetros
% dados en los artículos y los datos que tenemos de la batería que se esta modelizando"

xo = [ 2.025157 117.63 0.48 0.226 15.8 -40 ];

% limite inferior de los parámetros, se usa para acotar los valores.
lb = [ 1 50 0 0 5 -45 ]
% limite superior de los parámetros, se usa para acotar los valores.
ub = [ 3 158 2 2 20 -35 ]

options=optimset('Display','iter', 'MaxIter',10000, 'MaxFunEvals',50000, 'TolFun', 1e-9);
%options=optimset('Display','iter');
%options=optimset('Algorithm','interior-point', 'Display','iter','MaxIter',10000, 'MaxFunEvals',50000);
% options=optimset('Algorithm','interior-point', 'Display','iter');
% [x,fval] = fmincon('funcion_objetivo',xo,A,b,[],[],[],[],[],options)
[x,fval] = fmincon('funcion_objetivo_proyecto',xo,[],[],[],[],lb,ub,[],options)

%//*****PRIMER GRUPO CON DATOS DEL FABRICANTE*****//

%*****EJEMPLO 1*****
% $$$ Con esto (FIJANDO LA TEMPERATURA ) sale: //fval = 17.9360//
% //xo = [ 1.96 127.61 0.55 0.31 15.8 -40 ];
% //lb = [ 1 50 0 0 5 -40 ]
% //ub = [ 3 158 2 2 20 -40 ]
%//-----RESULTADOS:
% $$$ Kc Co+ epsilon delta In theta_f
% $$$ x = 1.1392 118.4990 0.3777 1.3253 14.5961 -40.0000

%*****EJEMPLO 2*****
% $$$ Con esto (FIJANDO LA TEMPERATURA Y LA In) sale: //fval = 17.5037//
% //xo = [ 1.96 127.61 0.55 0.31 15.8 -40 ];
% //lb = [ 1 50 0 0 15.8 -40 ]
% //ub = [ 3 158 2 2 15.8 -40 ]
%//-----RESULTADOS:
% $$$ Kc Co+ epsilon delta In theta_f
% $$$ x = 1.1463 68.6360 1.4804 1.3861 15.8000 -40.0000
```



En el programa anterior le tenemos que meter como datos unos valores iniciales (vector X_0) para que luego el programa proceda a ajustar esos valores, esos valores iniciales son los que hemos obtenido mediante interpolación de los de la batería del artículo, o mediante sentido común. También debemos indicar el límite superior e inferior que queremos para esos valores (L_b =lower bound o “límite inferior” y U_p =upper bound o “límite superior”). En el programa anterior también se pueden ver algunos de los resultados obtenidos. Dicho programa llama al programa de la figura siguiente para realizar los ajustes de los parámetros iniciales.

```
% Función objetivo para calcular los parámetros de la capacidad de la batería
% Referencias: "Dynamical Models of Lead-Acid Batteries Implementation Issues" Barsali
y Ceraolo
% "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries" Ceraolo
% x es un vector de 4 componentes:
% x(1) = Kc
% x(2) = Co*
% x(3) = epsilon
% x(4) = delta
function obj = funcion_objetivo_proyecto(parametros)
    length(parametros);
    Kc = parametros(1);
    Co = parametros(2);
    epsilon = parametros(3);
    delta = parametros(4);
    In = parametros(5);
    theta_f = parametros(6);
    % Ahora segun el fabricante cogiendo la misma tensión de descarga para todos los
    puntos 1.78V (Ceraolo dice eso por ahí)
    % $$$ Ah = [218 158 135 117 87];
    % $$$ A = [2,18 15,8 27 39 87];
    % Cogiendo todos los puntos (descargas C100 C10 C5 C3 C1 que indica el fabricante)
    horas = [ 268020 28955 16250 10280 3309 ];
    Ah = [160.3646 126.7222 123.2329 111.9696 79.6794 ];
    % valor de intensidad constante sacado como la media de los valores de I (que
    indicaba la fuente) e I (registrada con la sonda amperimetrica)
    %, y despues la media de ambos valores
    A = [2.1851 17.7365 27.0868 39.0032 86.684 ];
    % Valores de intensidad a 1.78V (Vamos a probar)
    % $$$ % Valores finales de temperaturas
    theta = [25 25 25 26 27 ];

    %In = sum(A)/length(A); % I* Intensidad representativa de la descarga
    % theta_f = -40; % Temperatura de congelación del electrolito
    % $$$ Ah-((Kc*Co*(1-theta./theta_f).^epsilon)./((1+(Kc-1)*(A./In).^delta)))
    % $$$ ((Kc*Co*(1-theta./theta_f).^epsilon)./((1+(Kc-1)*(A./In).^delta)))
    obj = sum(abs(Ah-((Kc*Co*(1-theta./theta_f).^epsilon)./((1+(Kc-1)*(A./In).^
    ^delta)))));
end
```

Básicamente lo que hacen estos dos programas es comparar las capacidades de los ensayos con el resultado de la fórmula de la capacidad, de manera que van variando los valores de K_c , C_0^* , ϵ , δ , I_n y θ_f , hasta conseguir que el error sea mínimo.

Para la obtención del resto de parámetros del modelo, o bien se han utilizado los mimos, por ejemplo los parámetros del modelo térmico, o se ha partido con unos valores supuestos a partir de lo dados en el artículo, para posteriormente mediante pruebas con el modelo ir ajustando esos parámetros con sentido común hasta conseguir la respuesta deseada del modelo que consiga que se ajuste a los ensayos.



4 SIMULACIÓN

Ahora procederemos a detallar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, para lo cual dividiremos la información en dos grandes apartados, en el primero de ellos (4.1) hablaremos de la simulaciones realizadas con el modelo de 3^{er} orden y en el segundo (4.2) hablaremos de las simulaciones realizadas con el modelo de 4^{to} orden.

4.1 Simulaciones de 3^{er} orden

a) Introducción al funcionamiento del modelo en simulink

Para la simulación se ha utilizado el siguiente archivo de matlab.m, que declara las variables del modelo (pulsando F5) y lo abre automáticamente, para así indicar en el modelo la intensidad y el tiempo de simulación.

```
%*****MODELO DE TERCER ORDEN*****  
  
%-----Declaración de variables y constantes-----  
  
%descarga  
titaA=26;Rtita=0.2;Ctita=15;tau1=1500;  
C0=122.7063;titaF=-40;epsilon=0.48;Kc=1.7;  
R00=0.0062;A0=-0.3;R10=0.001;Ke=1.7E-3;  
Em0=2.17;C0asterisco=122.7063;Iasterisco=15;delta=0.226;  
CItita=126.7222;  
  
%recarga  
Ep=1.95;A21=-8;A22=-8.45;R20=0.02;  
Gp0=2E-12;Vp0=0.1;Ap=2;  
  
run MODELO_FINAL;  
%-----  
%Estos valores de los parámetros son los que se han usado en todas las  
%simulaciones.
```

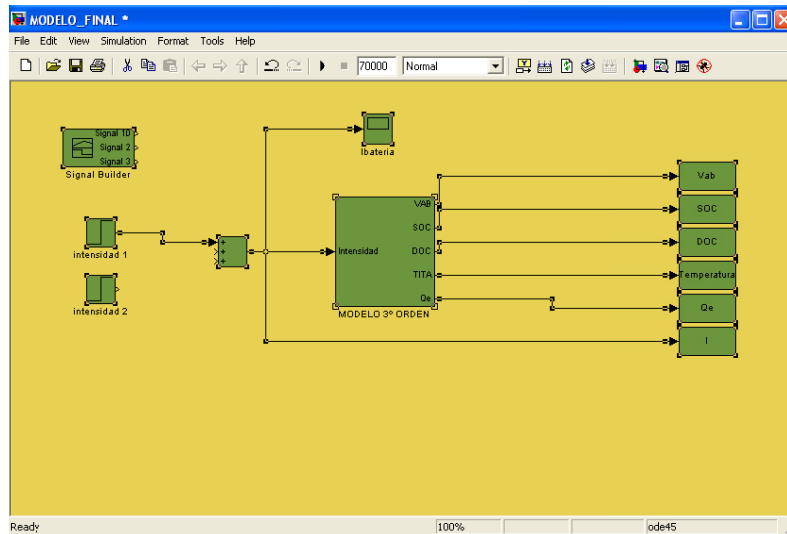
NOTA: en el archivo que declara las variables debemos indicar la capacidad de la batería (**rojo**) para el ensayo que queremos simular.

Hay que decir que hemos ajustado los parámetros que se ven en el archivo de MATLAB que vemos arriba para obtener los mejores resultados posibles en la simulación C10 (intensidad nominal), de esta forma las simulaciones entorno a esa corriente serán lo mas exactas posibles.

En cuanto a la simulación de carga no hemos obtenido buenos resultados, aunque hemos probado variar todos los parámetros que afectan a la carga no conseguimos que se ajuste, o de conseguir que se aproximen un poco las curvas, se desajustan para la descarga. A continuación describimos como se regula el modelo para indicarle la intensidad y el tiempo de descarga/carga.

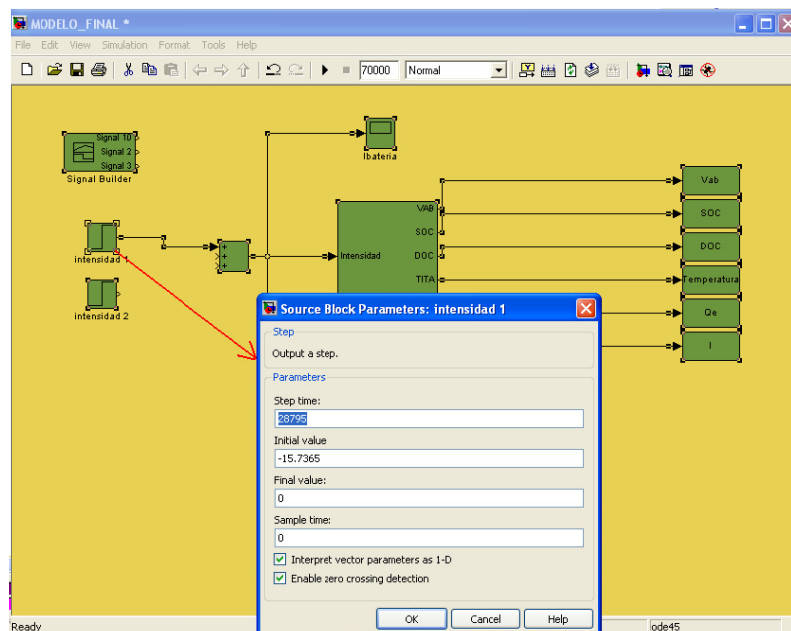


Primero debemos abrir el modelo, como se puede apreciar en la figura siguiente.



El tiempo de simulación lo tenemos fijado en 70000 segundos que valdrá para casi todas las descargas (ver figura anterior).

Luego procederemos a abrir el bloque que genera una función escalón, llamado “intensidad 1”, se puede ver en la figura siguiente la pantalla que nos saldría:



Definición de tiempo de descarga e intensidad

En esa ventana indicaremos al modelo la intensidad de descarga constante, y el tiempo en el que la corriente dejará de extraerse de la batería, es decir el tiempo en el que el bloque debe volver al valor 0 A.

Por último pulsamos en el botón  y la simulación comenzará.



b) Simulaciones de carga y descargas realizadas

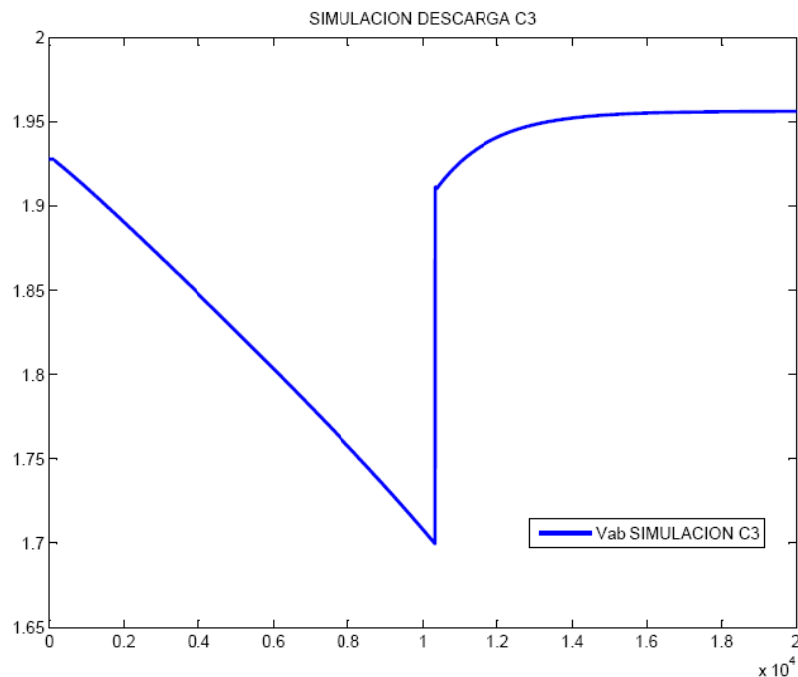
Se ha procedido a la simulación de casi todas las descargas realizadas con la batería a excepción de la descarga C1, ya que en este caso al ser la intensidad tan elevada, la batería cambia mucho su comportamiento y el modelo se aleja mucho de la descarga real, no obstante si se ha realizado la captación gráfica de la tensión en la simulación C1, para luego compararla con el ensayo C1.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

SIMULACION DESCARGA C1

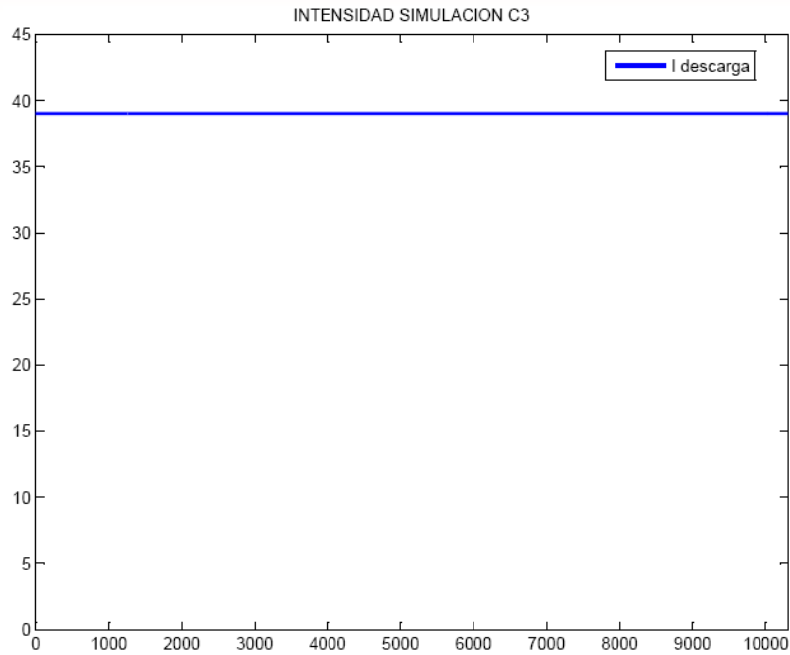
No se ha realizado, ya que los resultados obtenidos no eran de interés debido a su gran error.

SIMULACION DESCARGA C3



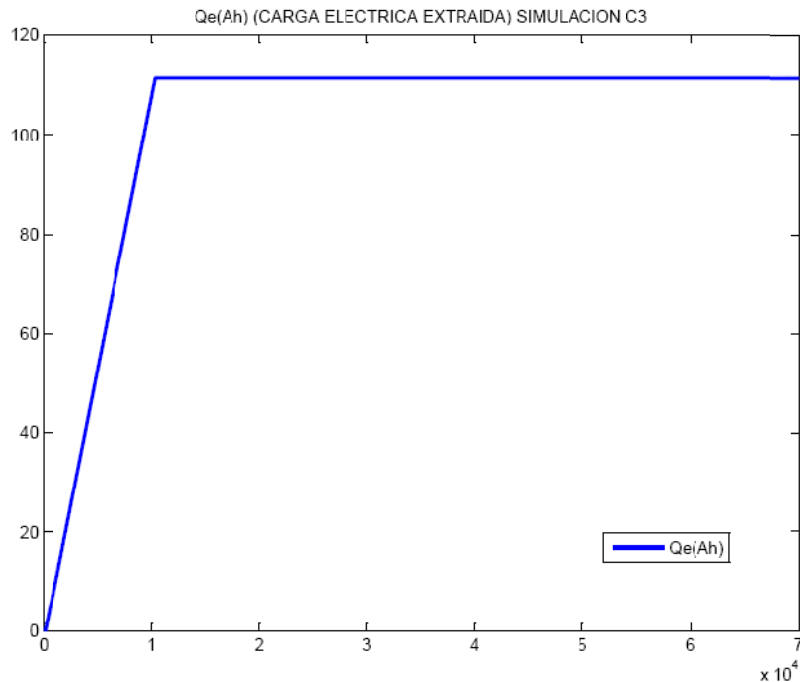
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En el modelo presente al hacer ensayos a intensidades muy elevadas, la curva de tensión de descarga se hace prácticamente recta, como se puede ver en esta gráfica de tensión.



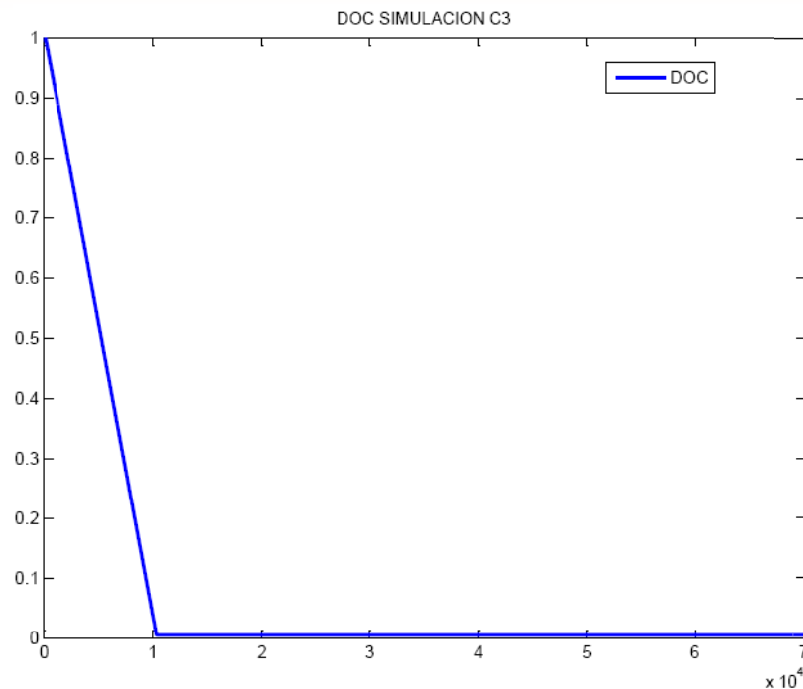
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto su valor es constante, e igual a 39 A.



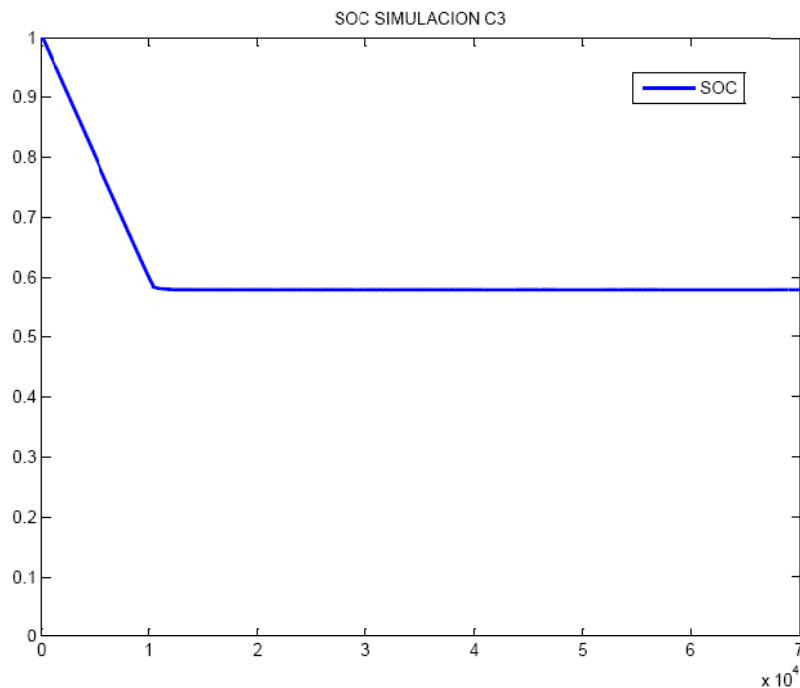
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo. Vemos que cuando dejamos de descargar a la batería, la Qe se mantiene constante durante el resto del ensayo.



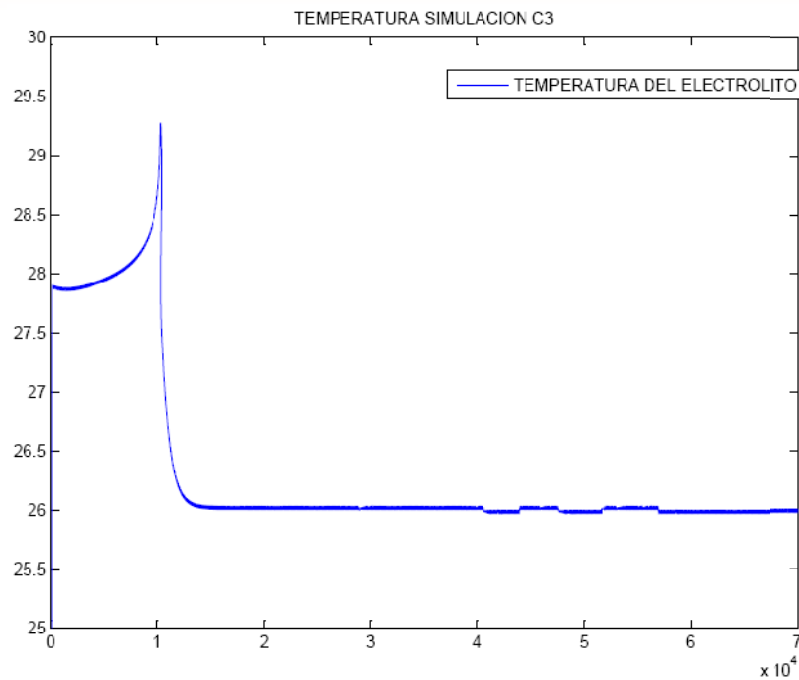
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=10280\text{seg}$. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, state of charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 58% de su capacidad máxima.

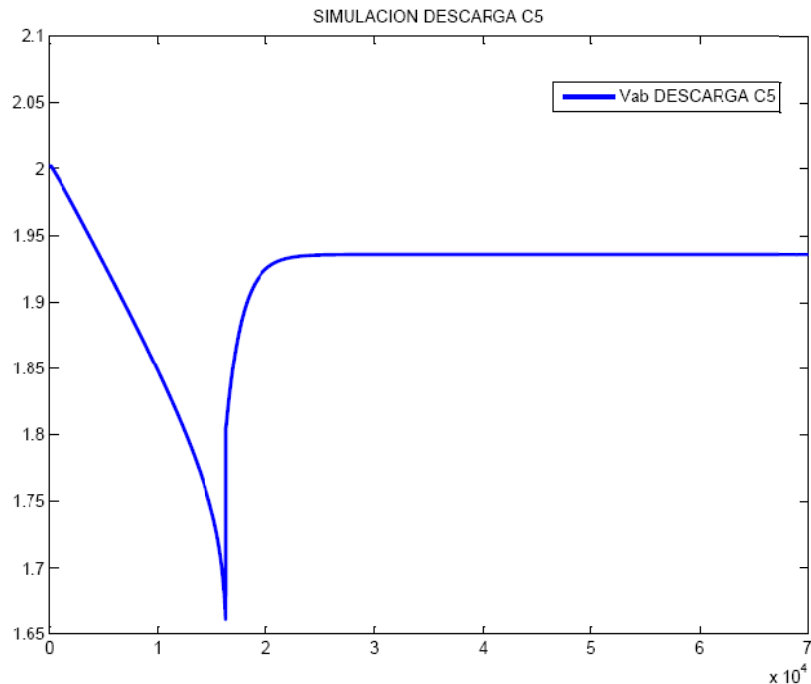


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como al inicio de la descarga la temperatura aumenta debido a la intensidad bastante elevada de este ensayo, y notamos que cuando la batería se está quedando sin carga la temperatura aumenta de forma exponencial. Una vez que ya dejamos de descargar la batería esta se va enfriando poco a poco hasta alcanzar la temperatura ambiente

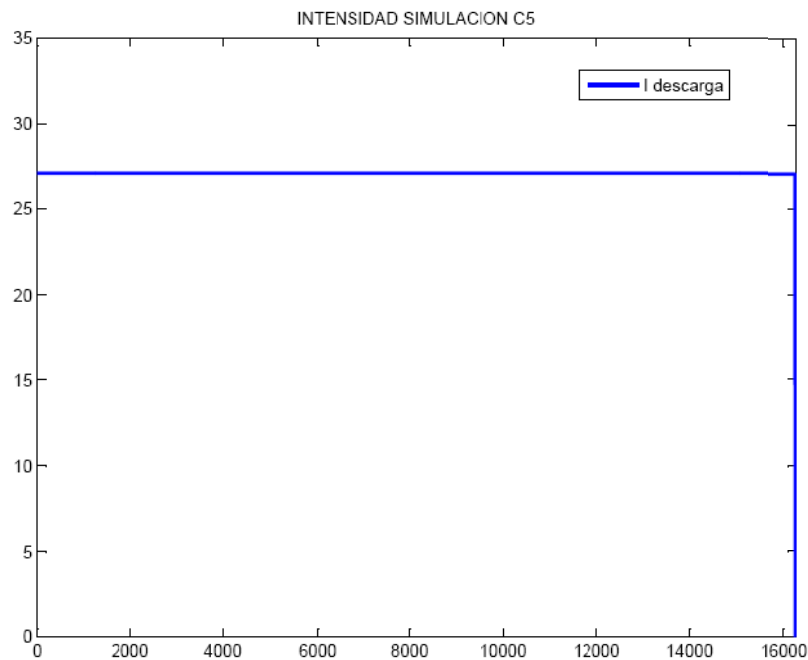


SIMULACION DESCARGA C5



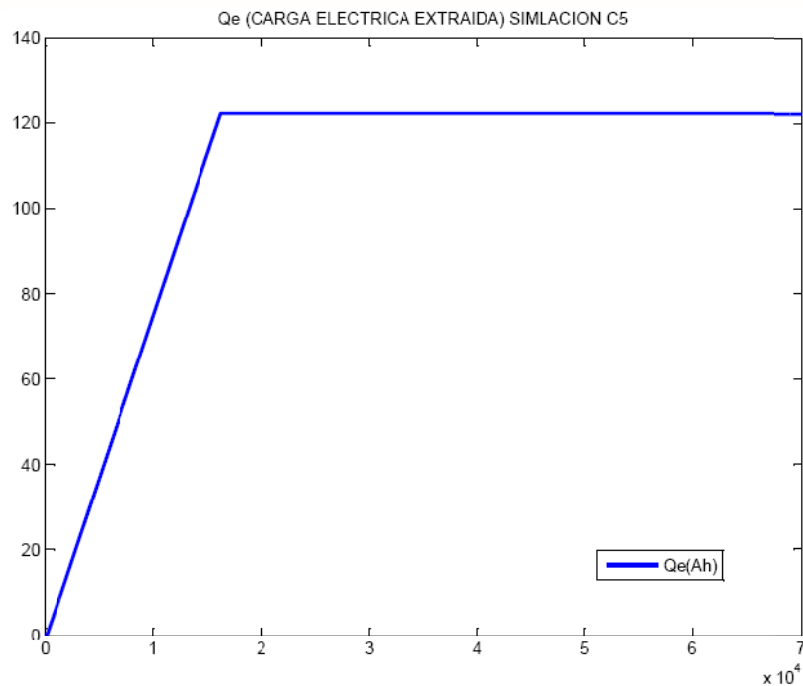
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, y también como se produce la recuperación de parte de la tensión entre estos. La simulación dura 16250 segundos.



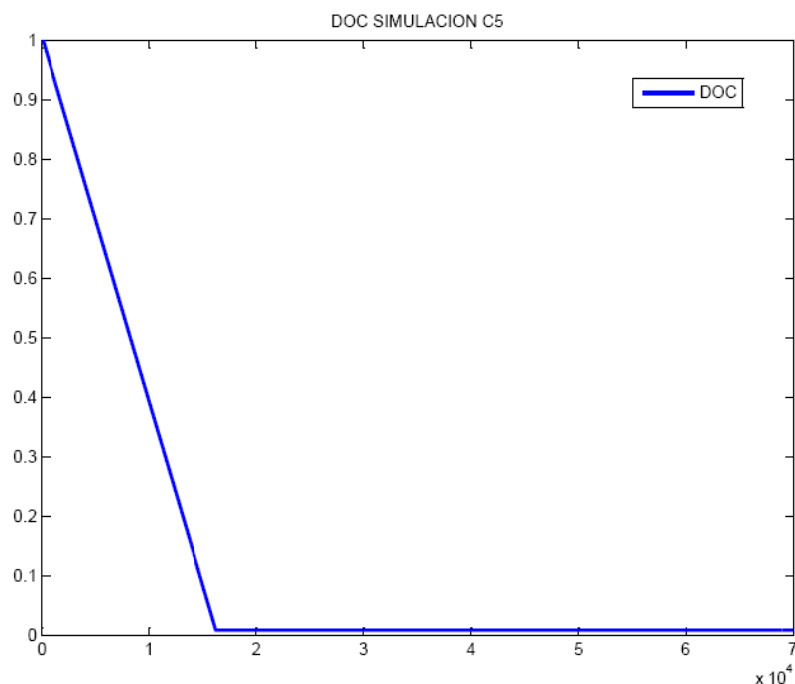
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto su valor es constante, e igual a 27 A.



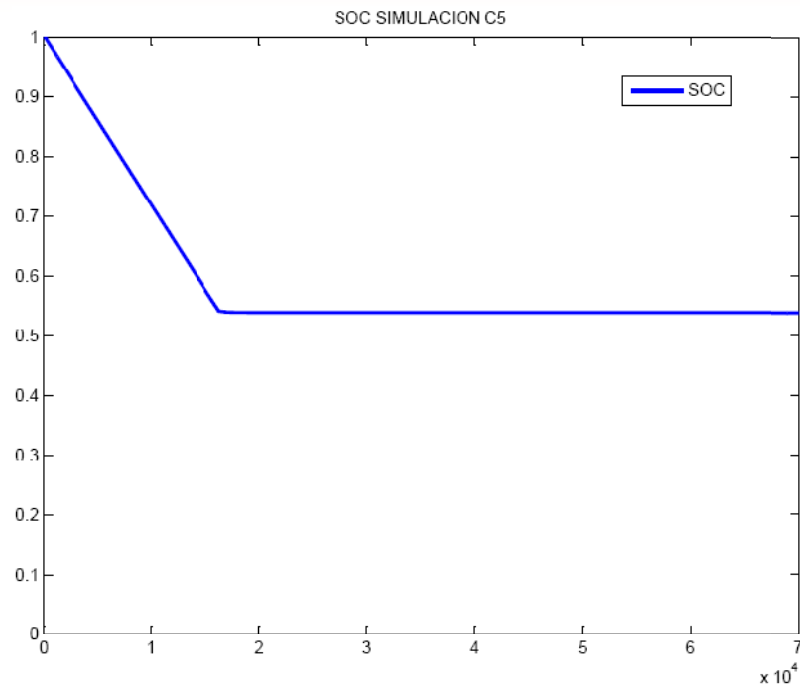
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo. Vemos que cuando dejamos de descargar a la batería, la Qe se mantiene constante durante el resto del ensayo.



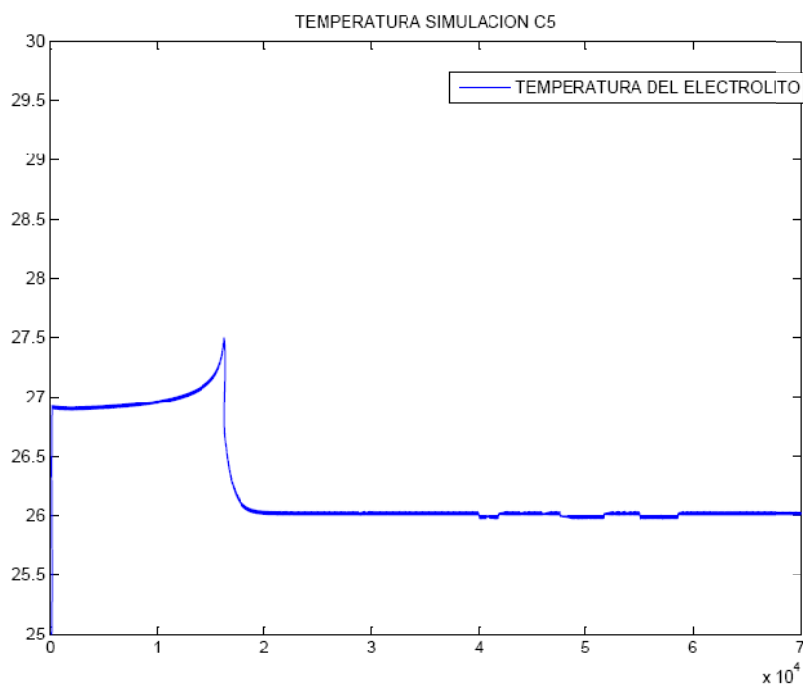
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=16250$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 54% de su capacidad máxima.

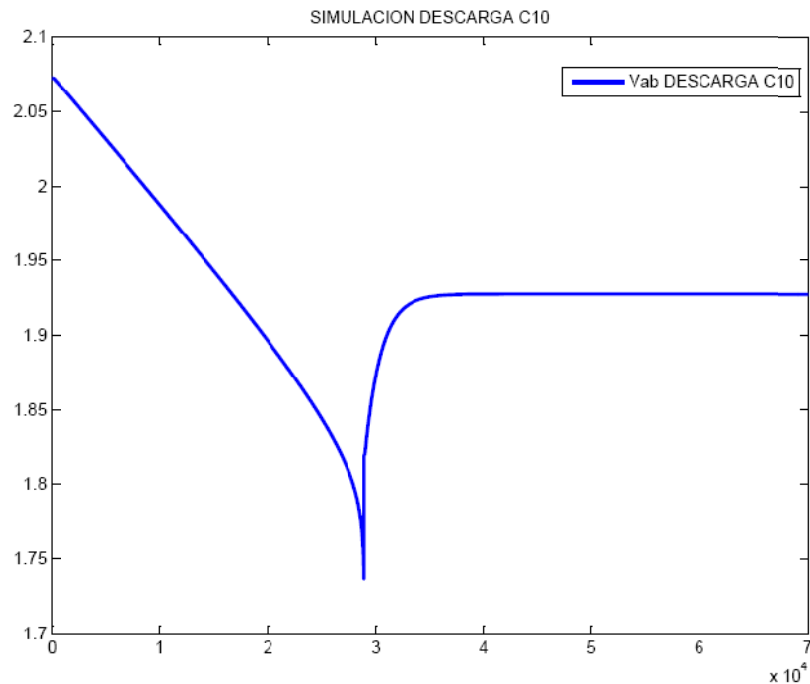


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como al inicio de la descarga la temperatura aumenta debido a la intensidad de este ensayo, y notamos que cuando la batería se está quedando sin carga la temperatura aumenta de forma exponencial.

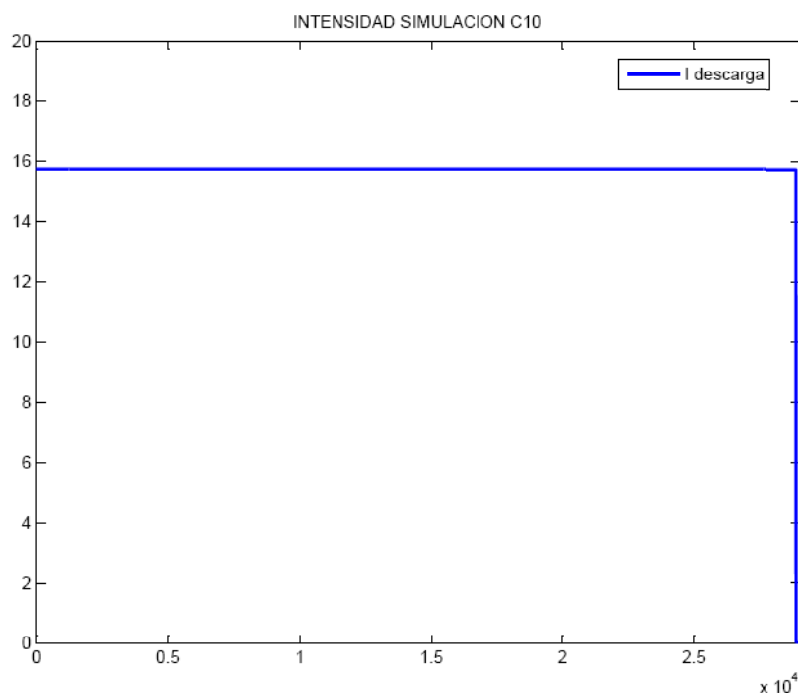


SIMULACION DESCARGA C10



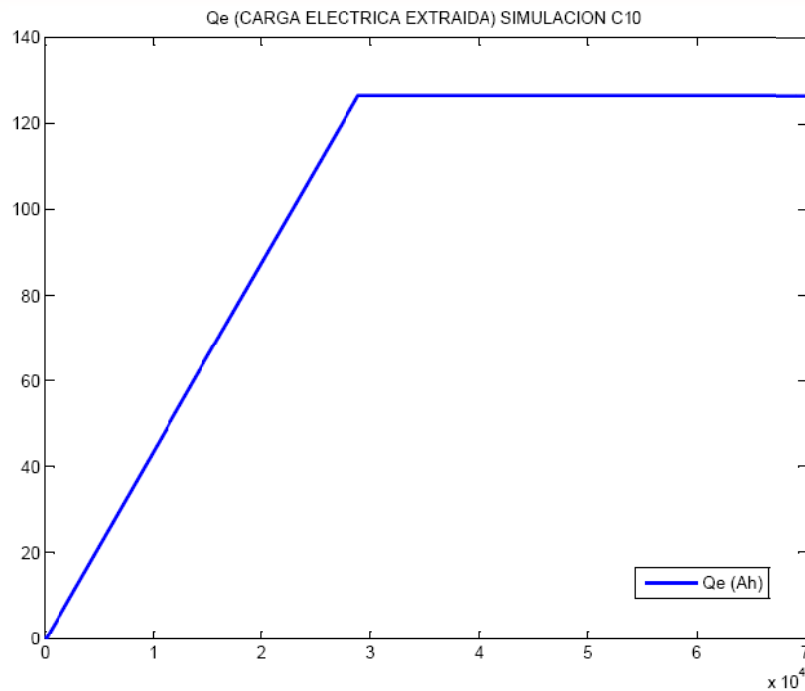
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, y también como se produce la recuperación de parte de la tensión entre estos. La simulación de descarga dura 28960 segundos.



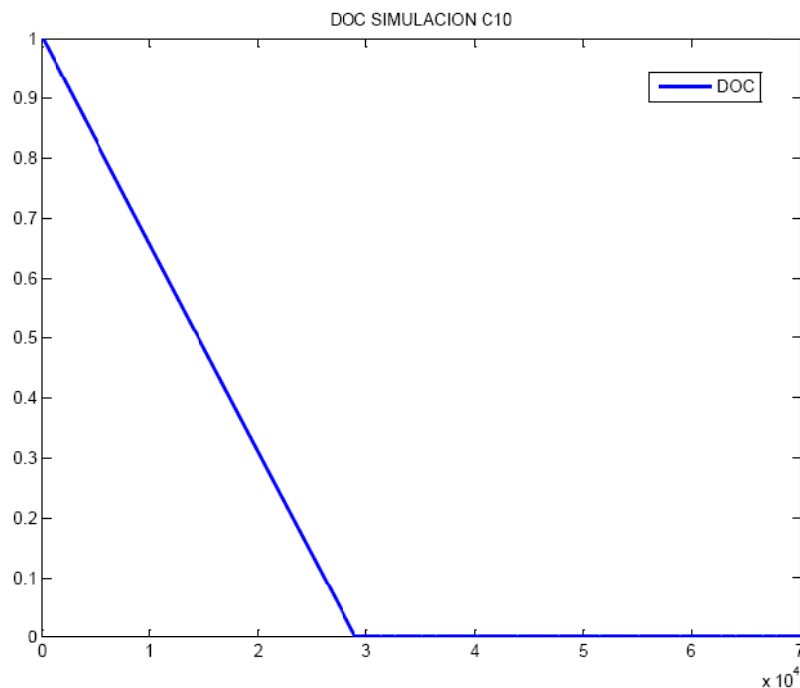
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 15,7365 A.



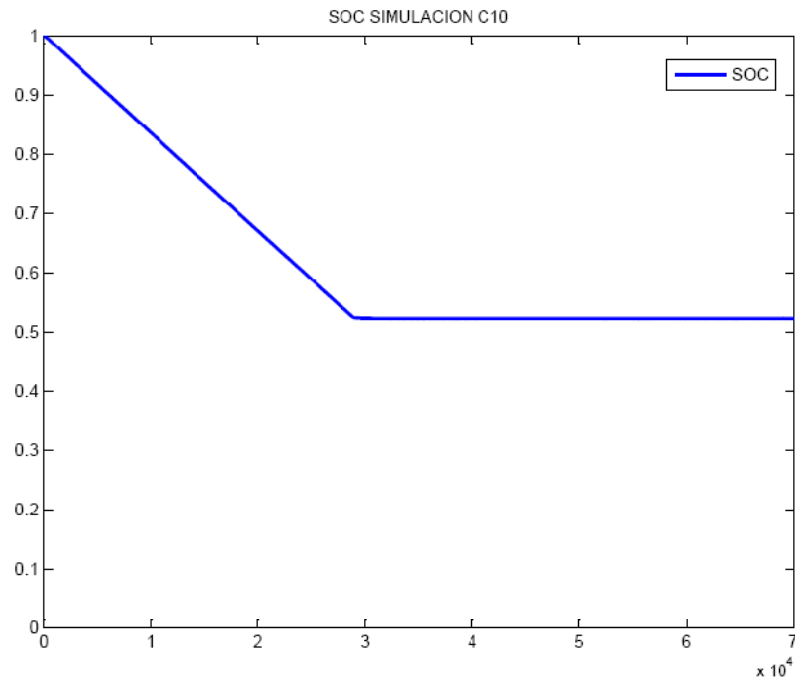
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



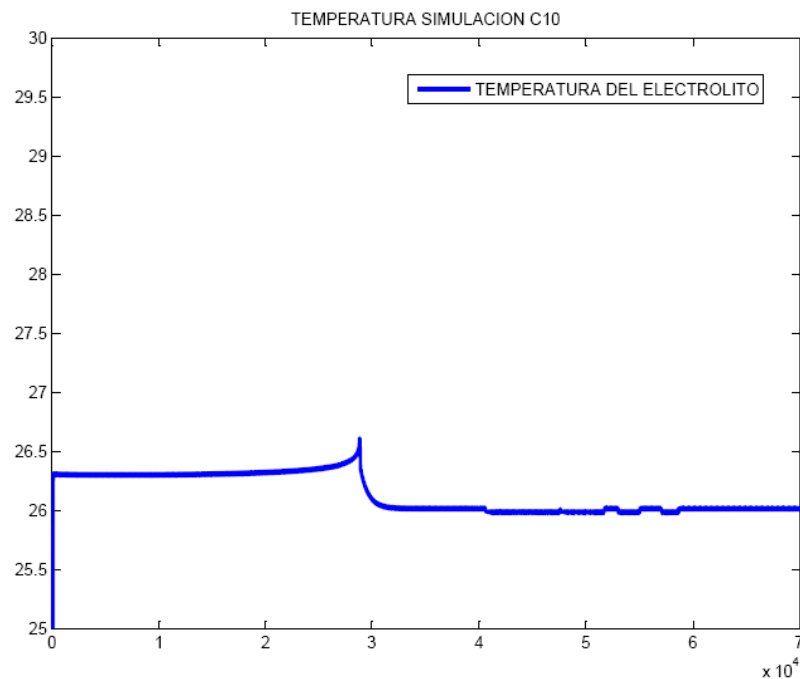
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=10280$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 52% de su capacidad máxima.

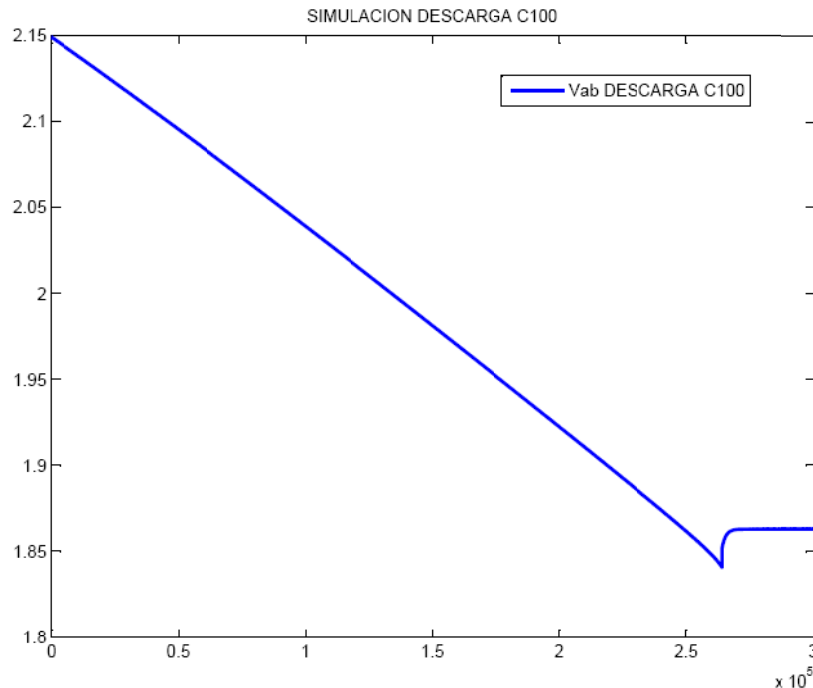


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta grafica de temperatura podemos ver como al inicio de la descarga la temperatura aumenta debido a la intensidad de este ensayo, y notamos que cuando la batería se está quedando sin carga la temperatura aumenta de forma exponencial

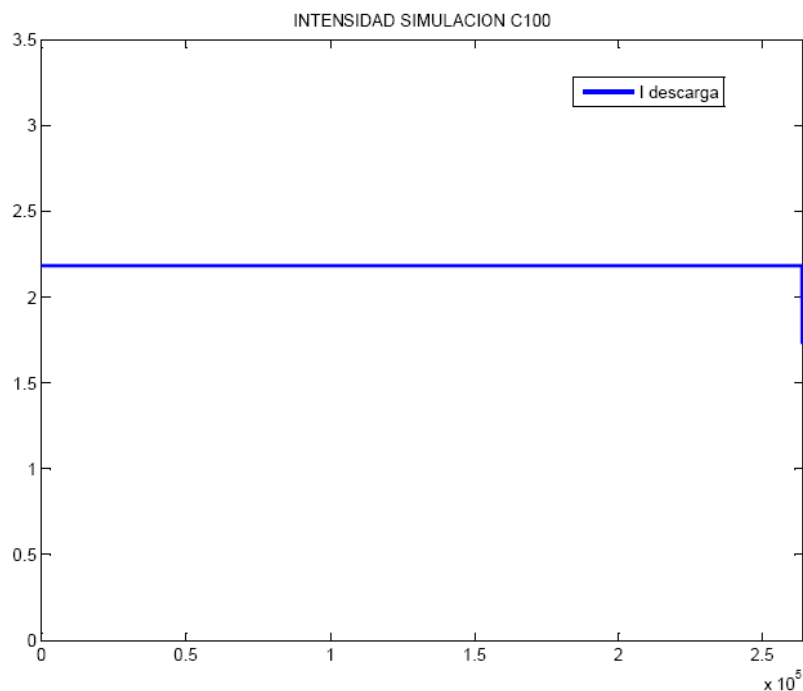


SIMULACION DESCARGA C100



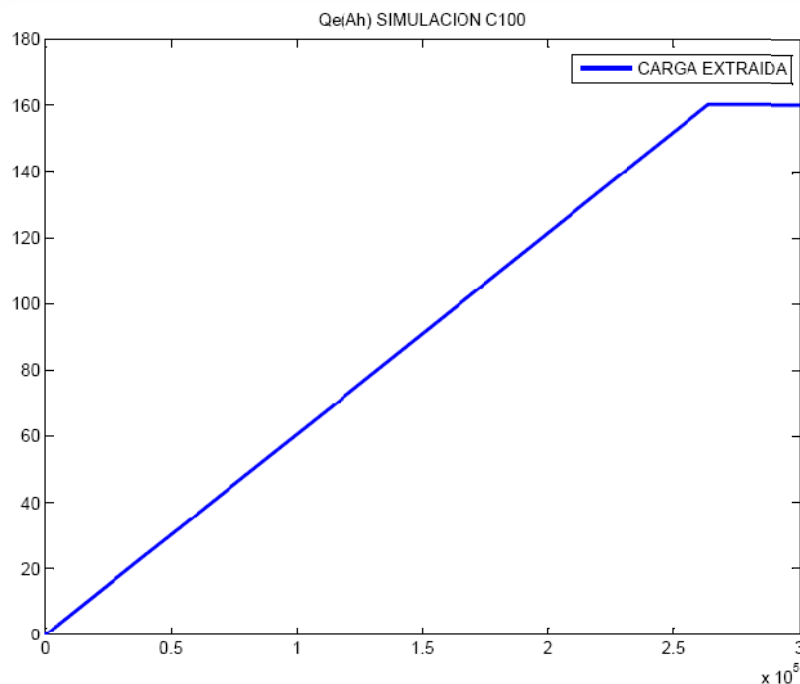
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, y también como se produce la recuperación de parte de la tensión entre estos. También se aprecia que la tensión en la descarga disminuye de forma recta, alejándose del ensayo C100



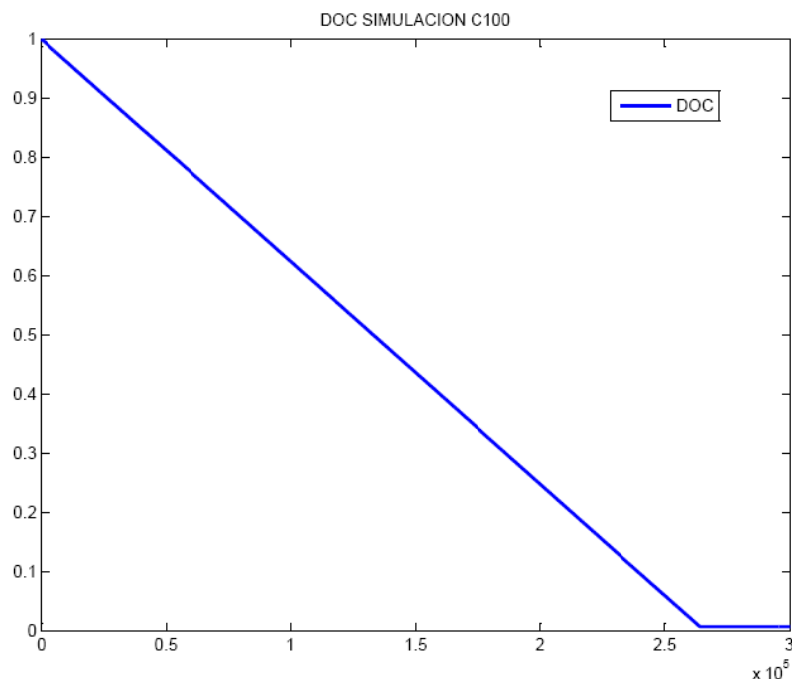
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto su valor es constante, e igual a 2,1851 A.



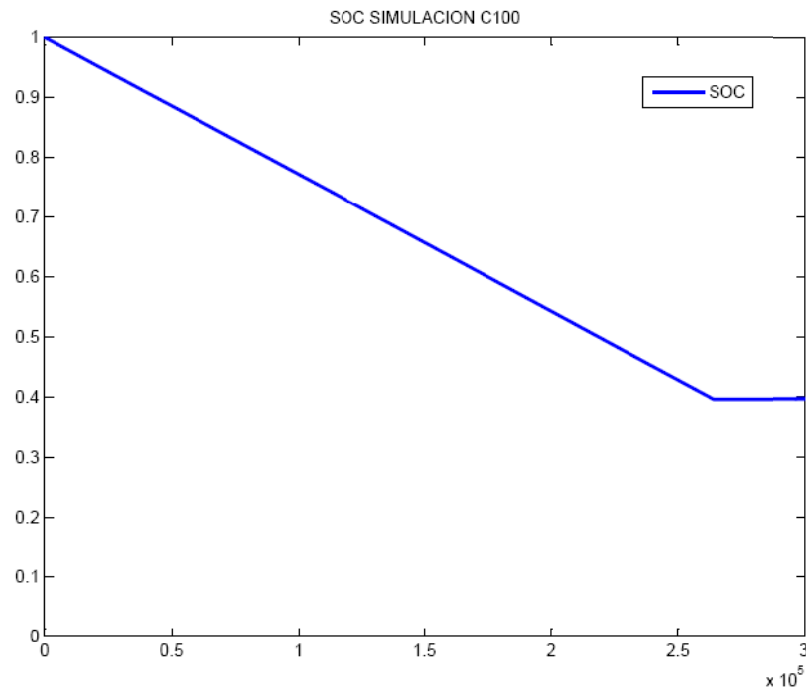
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



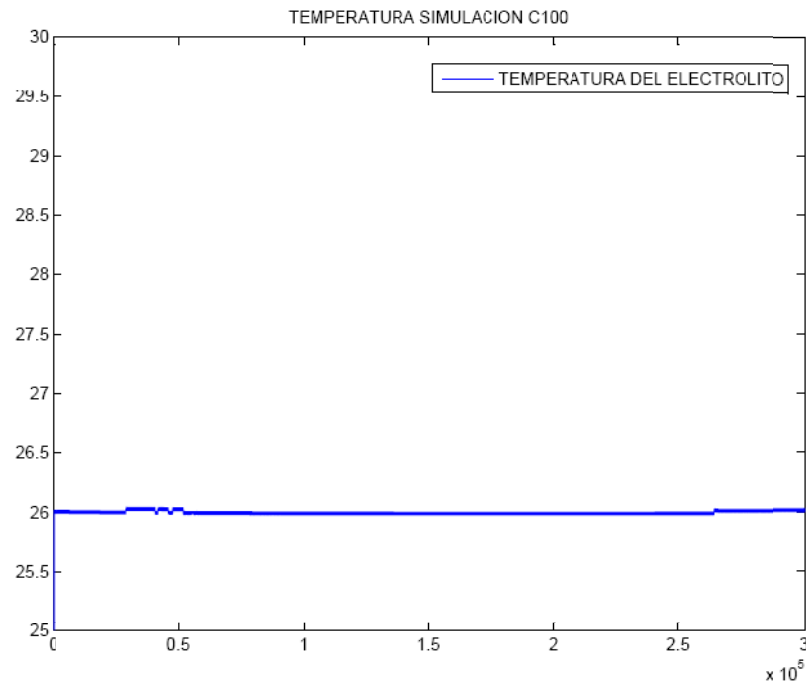
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque DOC=0 en el tiempo T=268020seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 40% de su capacidad máxima.

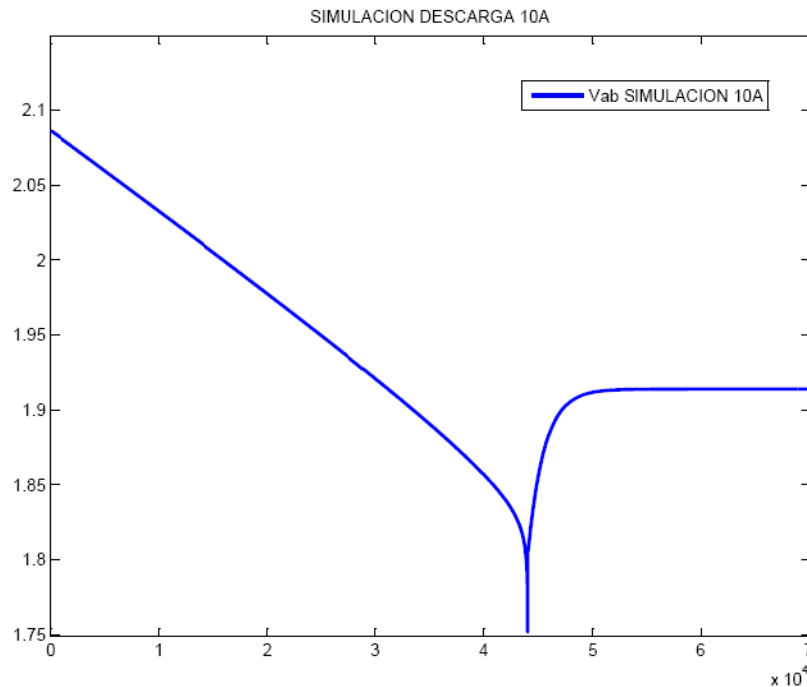


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica observamos como la temperatura del electrolito prácticamente no varía, esto es porque la intensidad de descarga es muy baja y por lo tanto se produce una descarga muy lenta que prácticamente no calienta la batería.

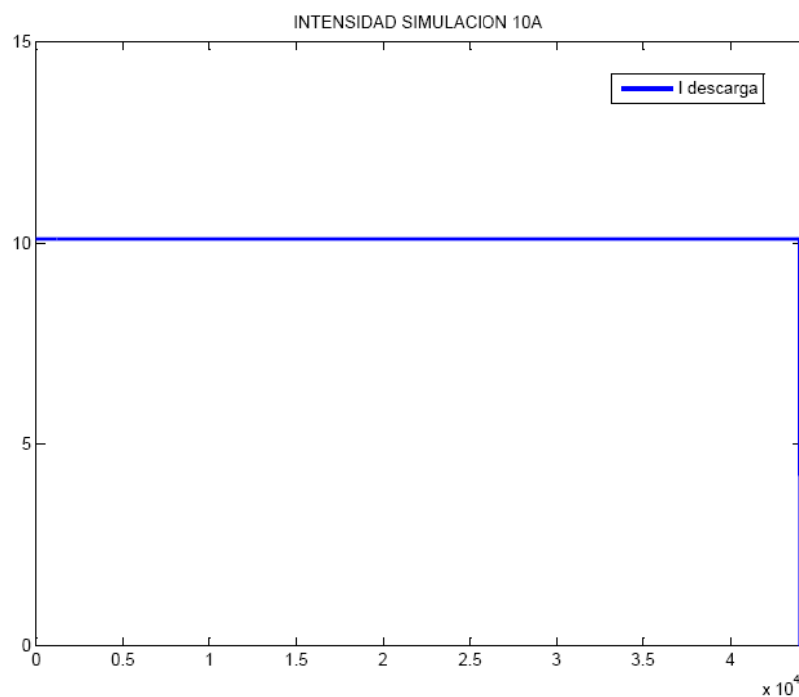


SIMULACION DESCARGA 10 A



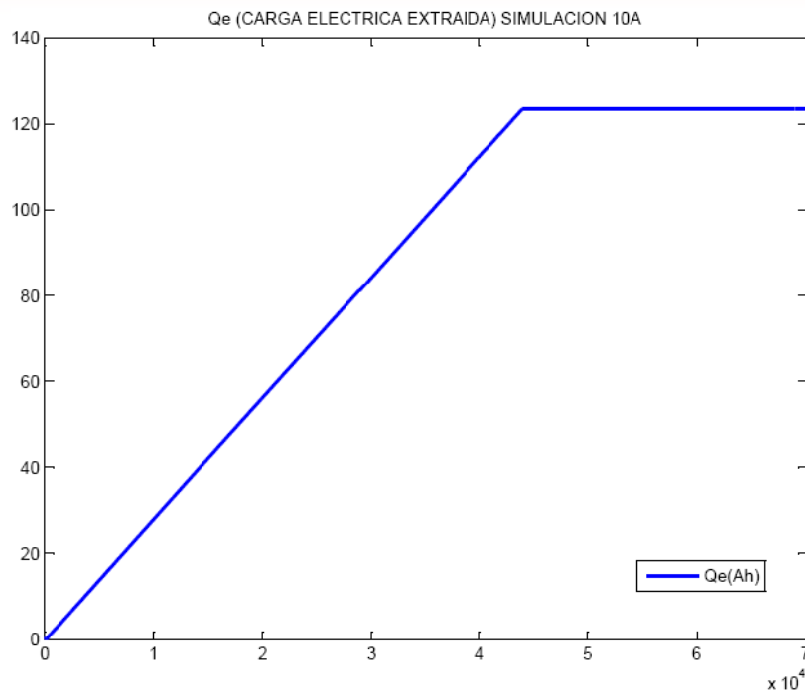
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, y también como se produce la recuperación de parte de la tensión entre estos.



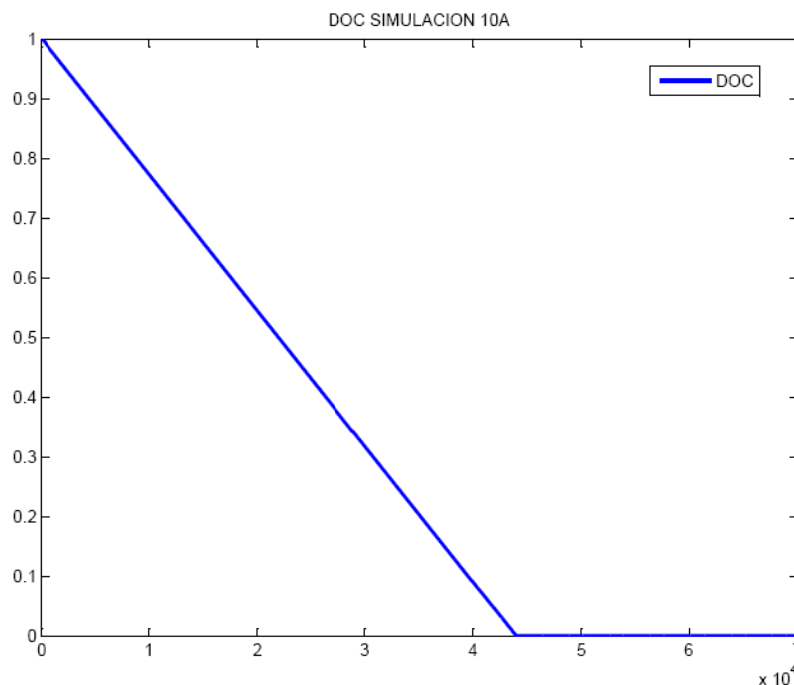
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 10,1011 A.



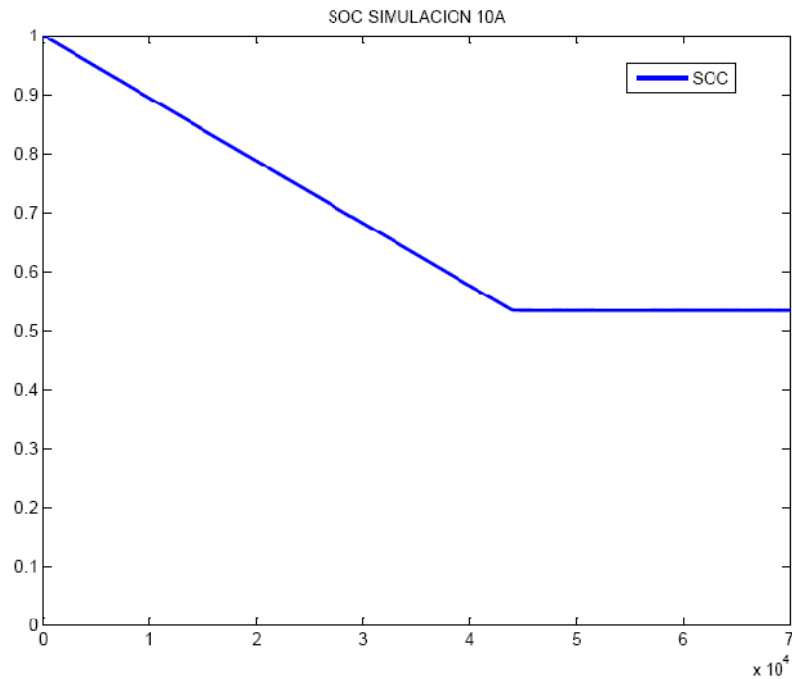
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



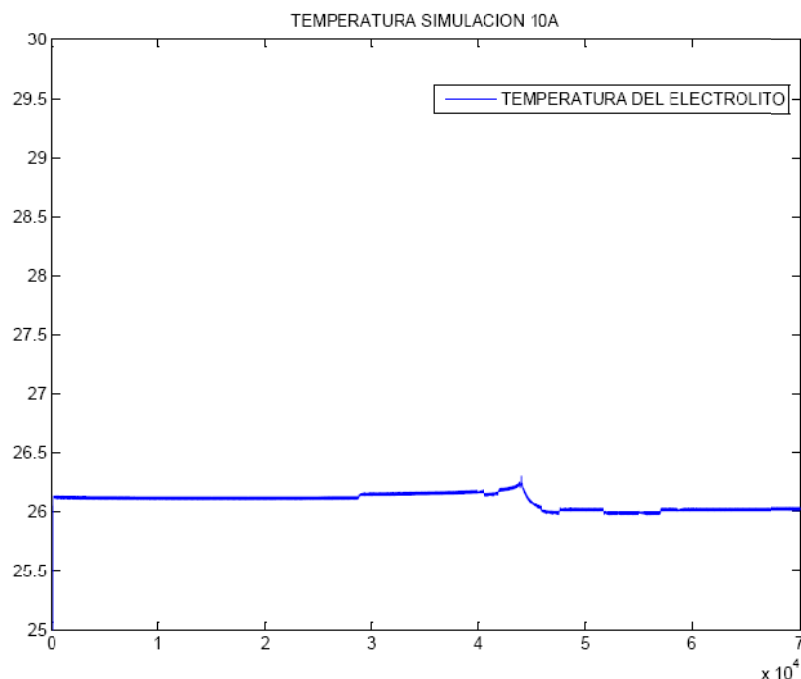
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=44055$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 54% de su capacidad máxima.

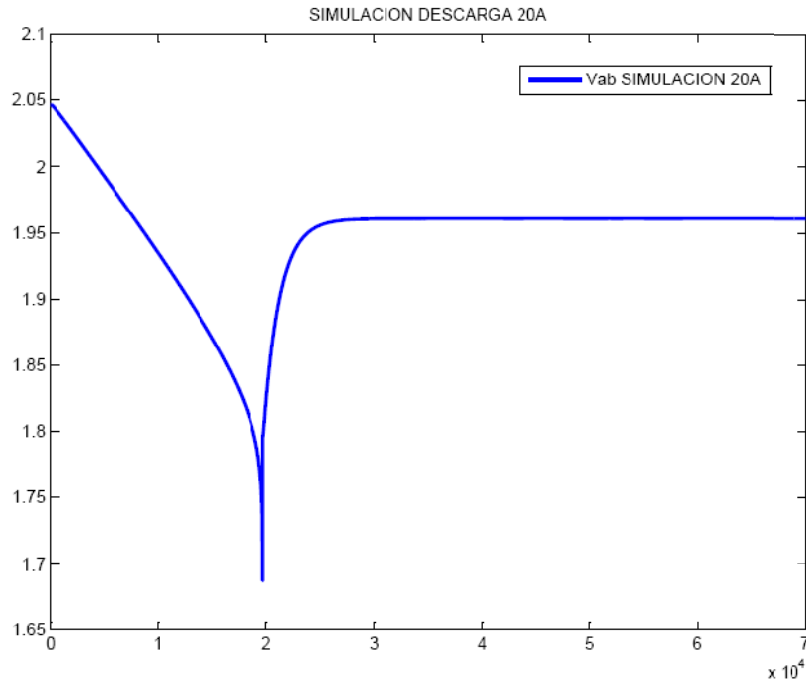


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica observamos como la temperatura del electrolito prácticamente no varía, esto es porque la intensidad de descarga es muy baja y por lo tanto se produce una descarga muy lenta que prácticamente no calienta la batería.

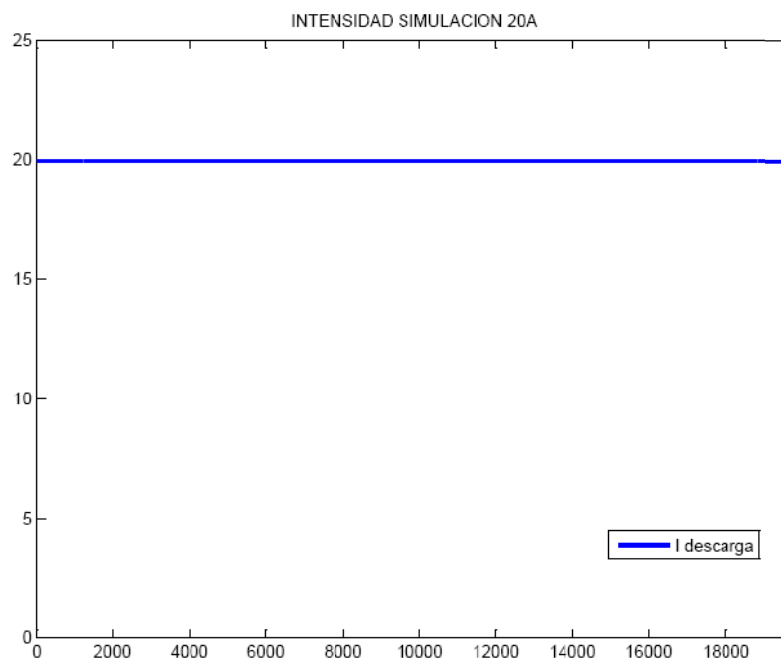


SIMULACION DESCARGA 20 A



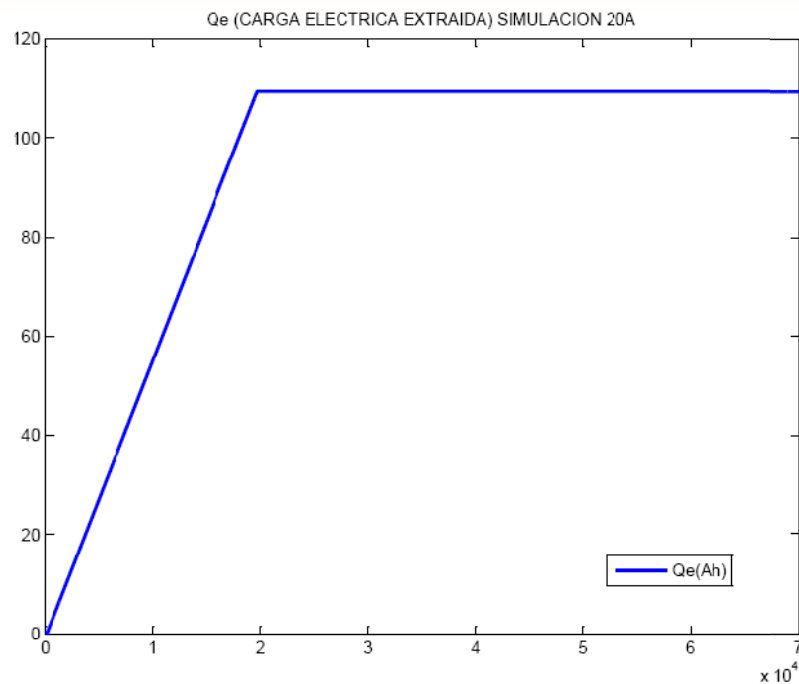
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, y también como se produce la recuperación de parte de la tensión entre estos.



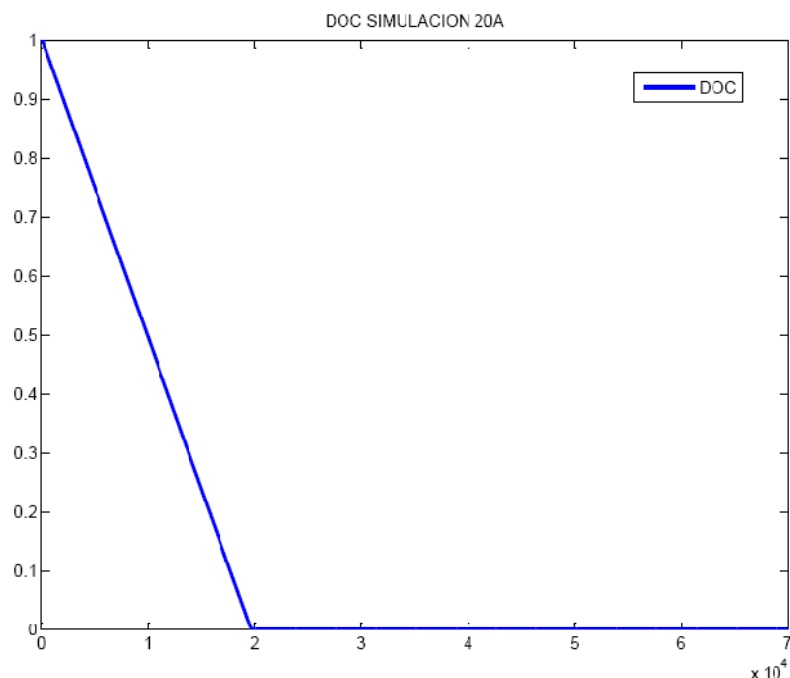
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 20 A.



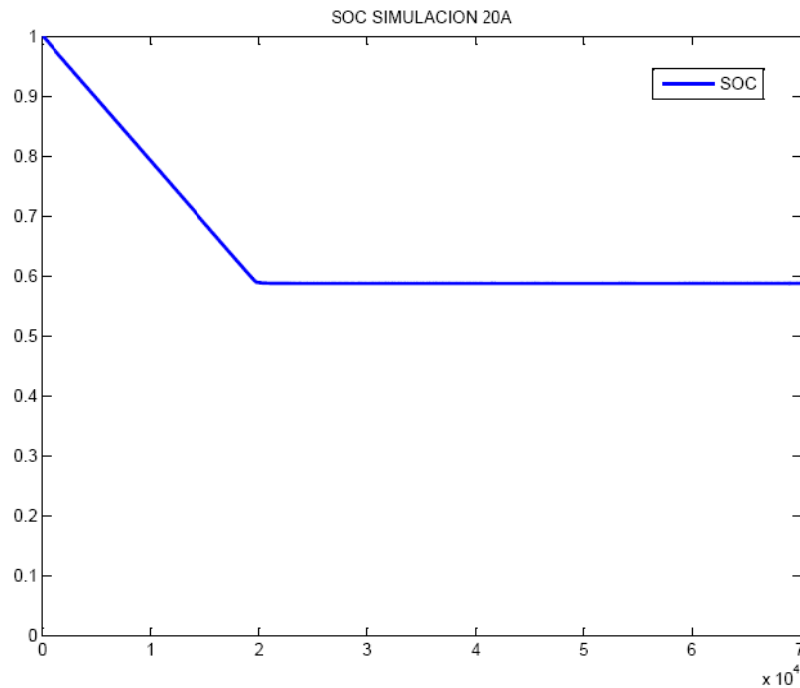
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



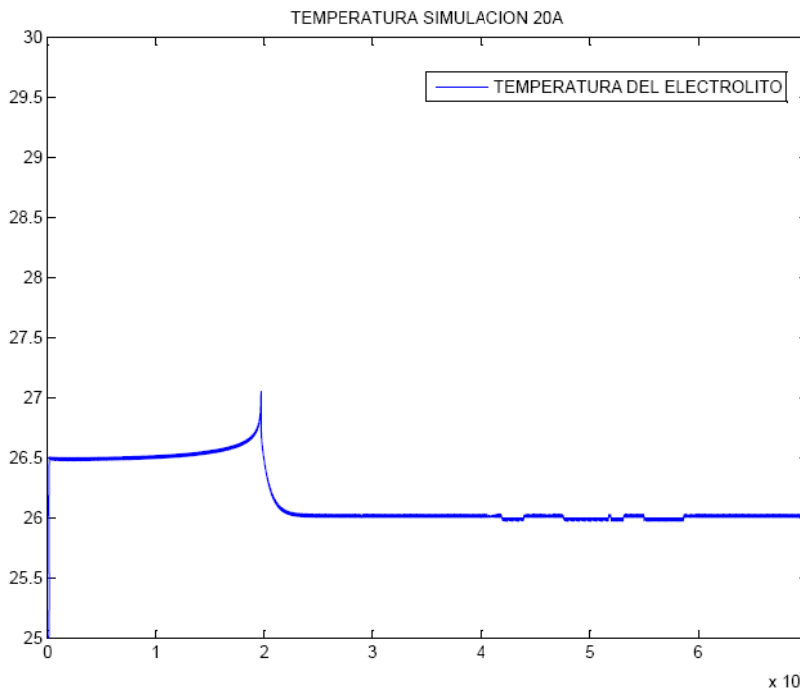
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=268020\text{seg}$. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 58% de su capacidad máxima.

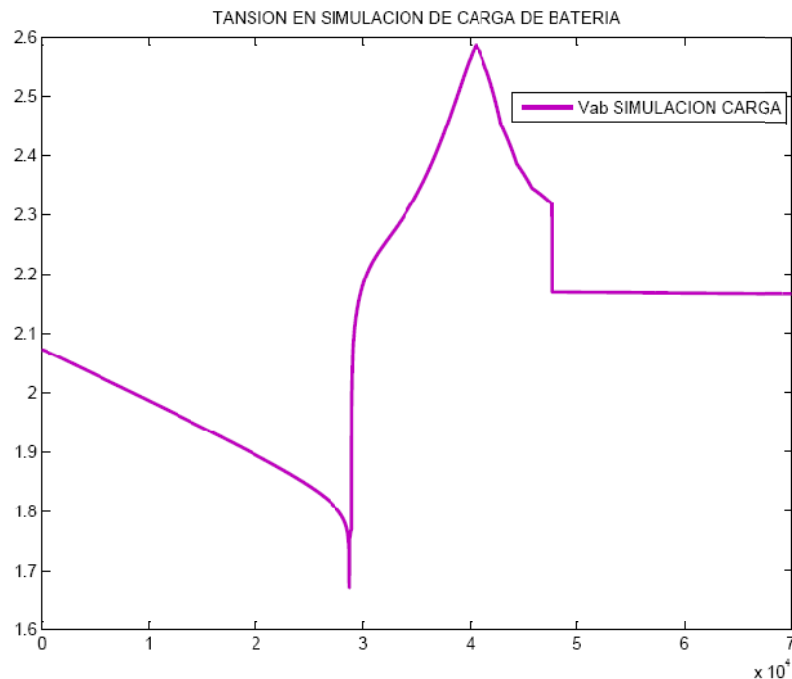


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica observamos como la temperatura del electrolito varía como máximo 1°C, alcanzando la temperatura máxima al final de la descarga de 20 A, después la batería se enfría hasta los 26°C del ambiente..

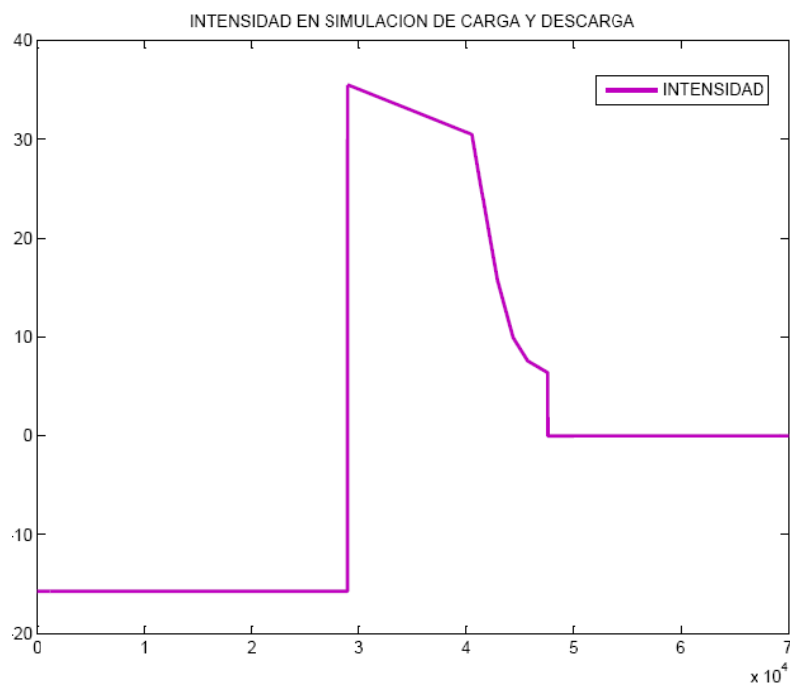


SIMULACION CARGA DE LA BATERIA



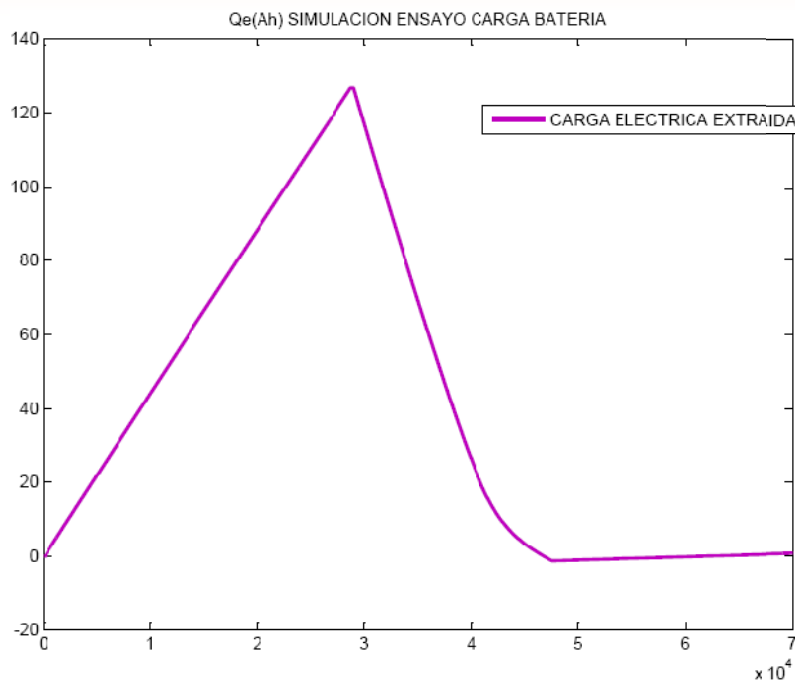
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

Podemos ver la simulación de la tensión entre terminales de la batería, la primer parte corresponde a la descarga C10 hasta los 28960seg., luego se simula la carga hasta los 47560seg., obteniéndose un resultado bastante malo.



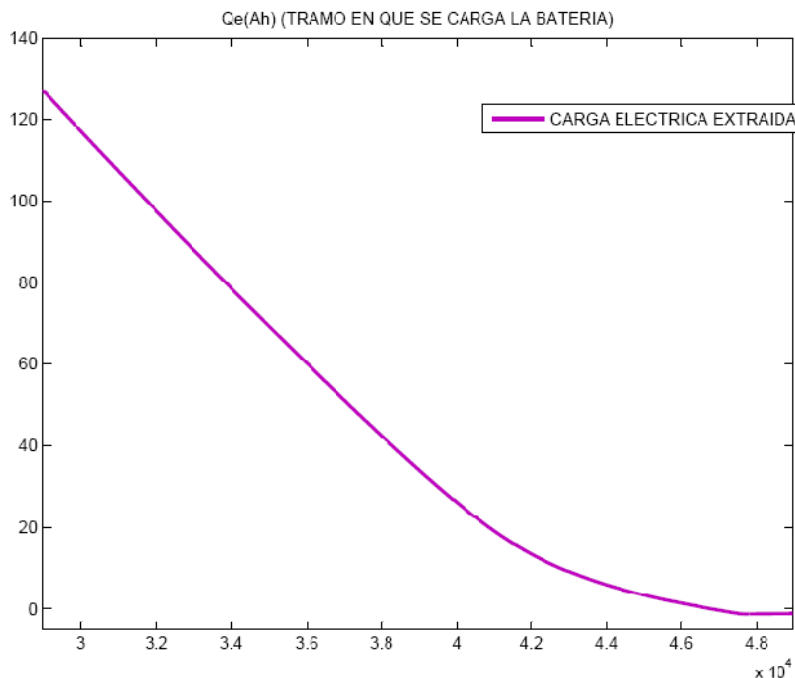
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es una variable que le metemos al modelo, por lo tanto su valor es constante durante la descarga C10 y toma el valor que se aprecia en la gráfica durante la carga (el valor de la carga es el registrado en el ensayo).



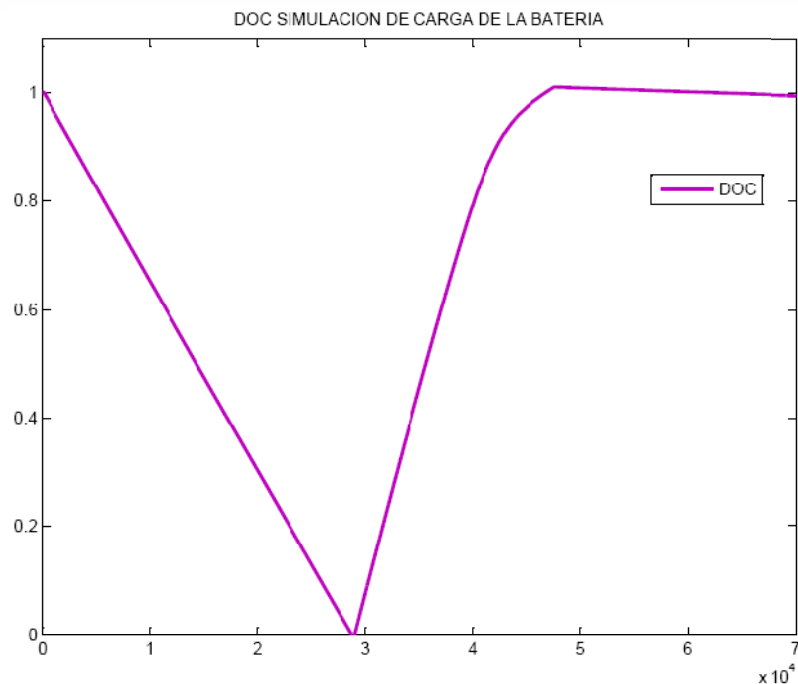
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo en el intervalo de descarga, en cambio al final del tramo de carga no lo hace de forma lineal, porque la intensidad no es constante.



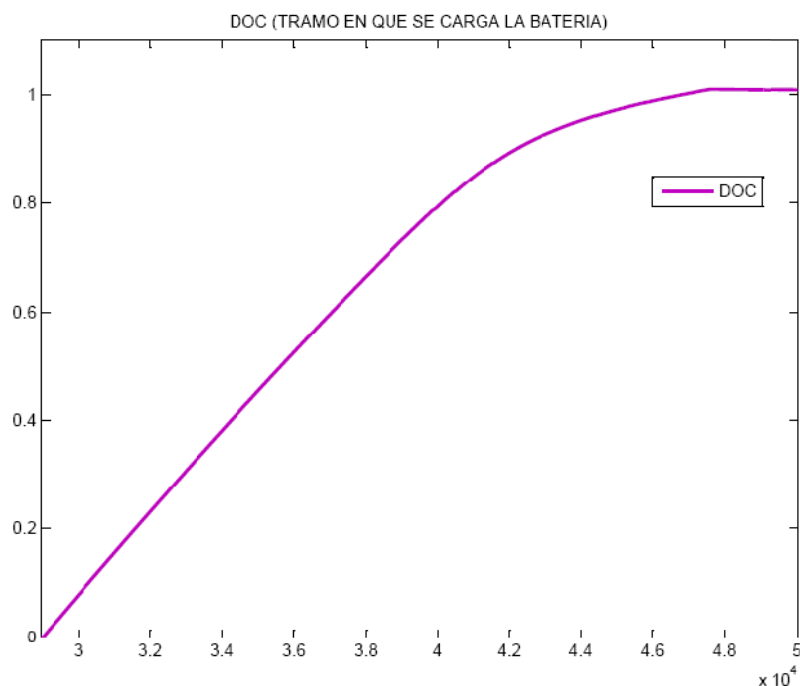
Variación de la Qe durante la carga

Esta gráfica es la misma que la anterior pero solo viendo la parte de la carga de la batería, se aprecia que Qe toma valor negativo al final de la carga, esto es porque se le ha medido más carga a la batería que la que se le extrajo en la descarga C10.



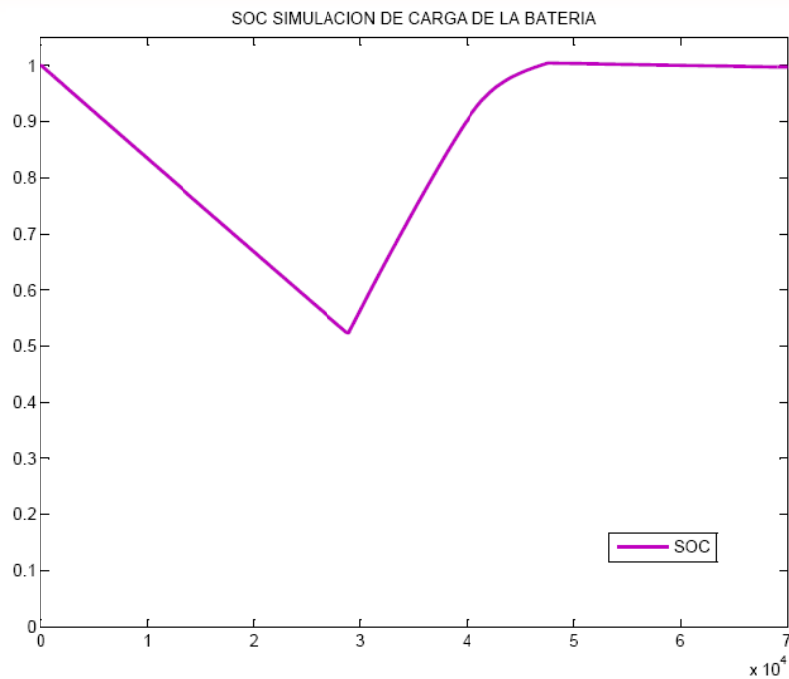
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior se produce una descarga de la batería completa, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=268020\text{seg}$ y lo hace de forma lineal debido a la intensidad constante.



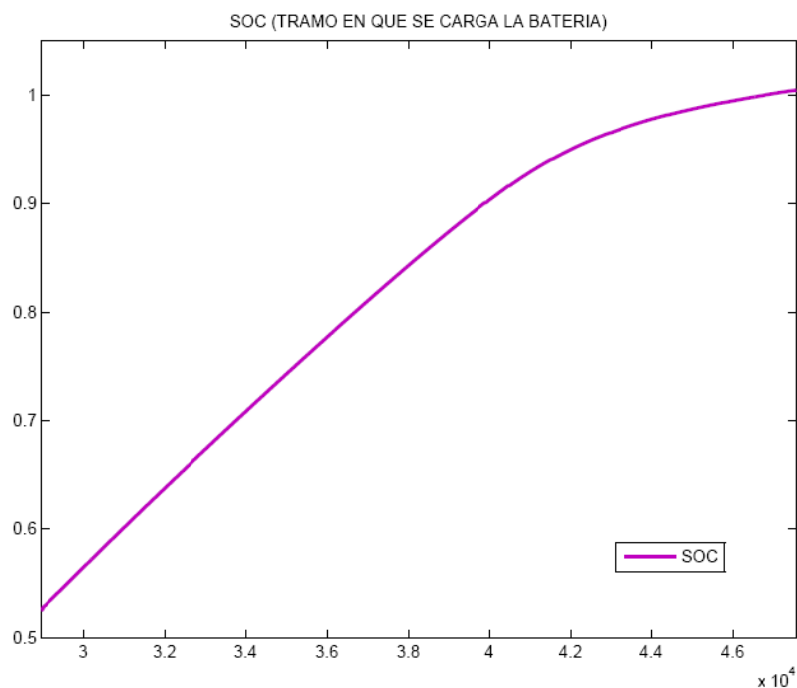
Variación del parámetro DOC durante la carga

Esta gráfica es la misma que la anterior pero solo viendo la parte de la carga de la batería, se aprecia que DOC toma un valor mayor que la unidad al final de la carga, esto es porque se le ha metido más carga a la batería que la que se le extrajo en la descarga C10.



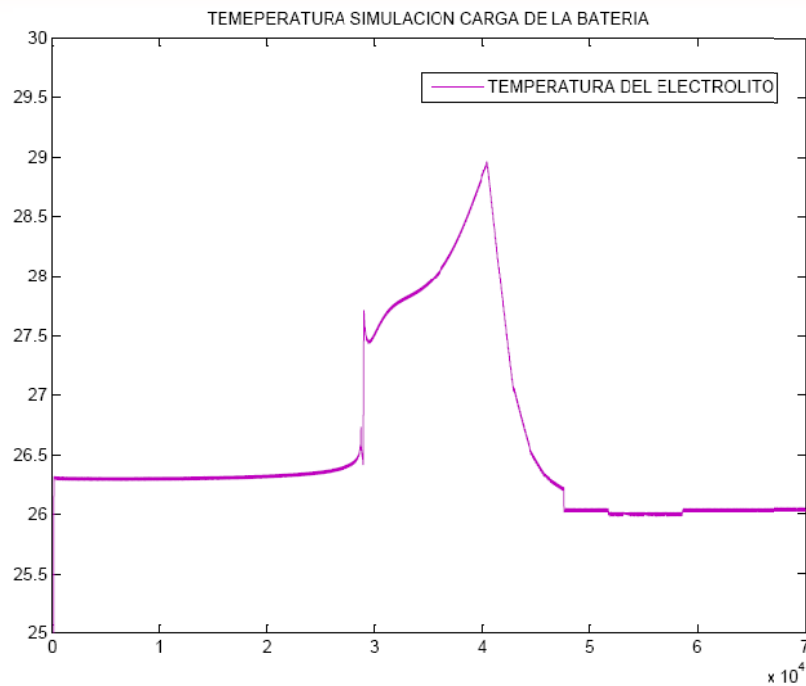
Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En la representación anterior podemos ver como la batería se descarga linealmente y el valor de SOC llega a tomar el valor de 0,52. Luego al cargarse la batería, SOC aumenta hasta alcanzar la unidad, aunque no lo hace de forma lineal, debido a que la intensidad no es constante durante la carga.



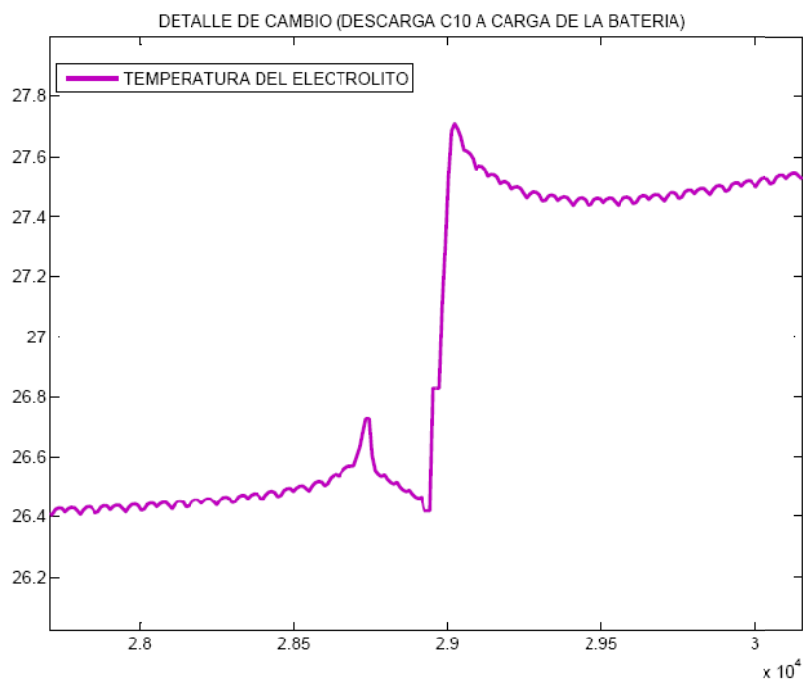
Variación del parámetro SOC durante la carga

En la representación anterior se ve más detalladamente cómo se suaviza la curva al final de la carga.



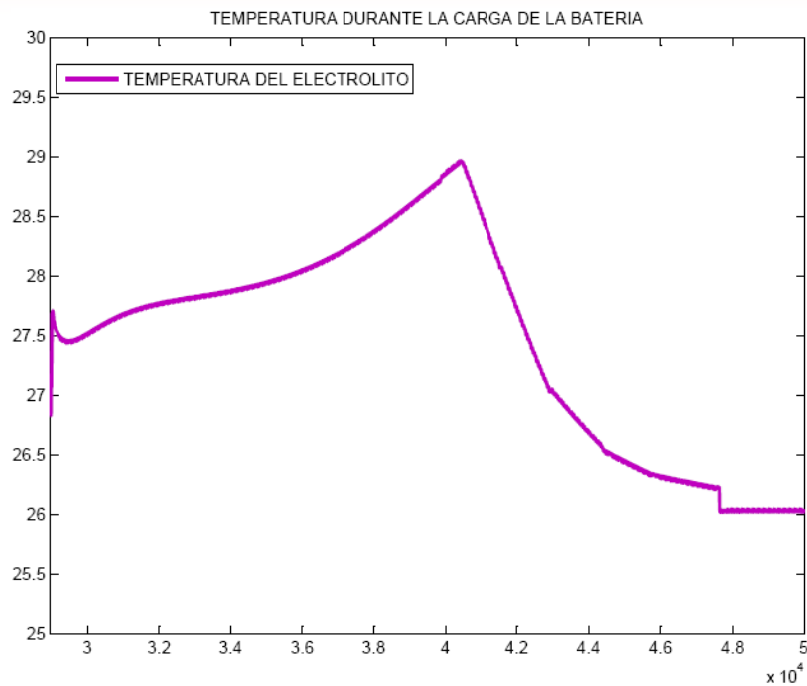
Variación de la temperatura durante el ensayo

Vemos que la temperatura se mantiene prácticamente constante durante la descarga a unos 26,4°C, pero en la carga aumenta hasta los 27,5°C al principio, llegando hasta los 29°C en la carga.



Detalle de la temperatura entorno al cambio de ensayo

Vemos que la temperatura apenas si aumenta al final de la descarga, luego el electrolito comienza a enfriarse, pero en ese momento se empieza a cargar la batería aumentando bruscamente hasta los 27,6°C aprox.



Detalle de la temperatura durante la carga de la batería

En esta gráfica apreciamos la variación de la temperatura durante la carga de la batería, se presentan unas variaciones muy raras debido a que la intensidad no es constante, alcanza el valor máximo de temperatura en el punto en que la intensidad comienza a disminuir rápidamente, hasta entonces la intensidad se mantenía por encima de los 30 A, produciendo mucho calor.



4.2 Simulaciones de 4^{to} orden

a) Introducción al funcionamiento del modelo en simulink

Para la simulación se ha utilizado el siguiente archivo de matlab.m, que declara las variables del modelo (pulsando F5) y lo abre automáticamente, para así indicar en el modelo el tiempo de simulación.

```
%-----DECLARACION DE PARAMETROS DEL MODELO DE 4to ORDEN-----  
%  
%  
%-----PARAMETROS NOMINALES DE LA BATERIA-----  
%  
Cn=158;In=15.8;titaN=26;  
%  
%-----CARGA INICIAL DE LA BATERIA-----  
%  
Q0=0.005*Cn;  
%  
%-----DECLARACION DE CONDICIONES-----  
%  
%Iasterisco = intensidad representativa de la descarga.  
Iasterisco=In;  
%CItita= capacidad de la batería a una determinada intensidad y temperatura  
CItita=126.7222;  
%  
%-----PARAMETROS DE LA BATERIA-----  
%  
C0=122.70;Kc=1.7;Delta=0.4;epsilon=0.5;titaF=-40;Ep0=2.09;Ke=0.0004;  
Rp0=0.002;Beta=-0.003;Rc=0.003;Rd0=0.05;Ad1=0.001;Ad2=-15;Ad3=-8.45;  
TAUd=100;TAUw=5400;Gs0=4E-13;Asv=9.95;Astita=0.07;TAUtita=14400;R=1.2;  
Es=1.95;  
Id=-15.7365;  
%  
%-----ABRIR EL MODELO-----  
%  
open MODELO_FINAL_4to;
```

NOTA: en el archivo que declara las variables debemos indicar la capacidad de la batería (rojo) para el ensayo que queremos simular, ya que aunque las formulas de la capacidad de la batería a una determinada intensidad de descarga y temperatura da mejores resultados que con el modelo de 3^{er} orden, se consiguen mejores aproximaciones de los parámetros SOC, DOC y Qe si metemos directamente en el modelo el valor de $C(i,\theta)$. El hecho de considerar este parámetro y no calcularlo con su formula no introduce modificación alguna en la curva de tensión obtenida en la simulación.

Con los valores de color azul le estamos diciendo al modelo que descargaremos la batería a una intensidad determinada y que la carga inicial extraída de la batería será de 0,005 veces la capacidad nominal esto representa que la batería está prácticamente a 100%, no se pone como condición que la batería



esta a 100% porque Ceraolo dice en sus artículos que si hacemos esto se producen singularidades en el modelo.

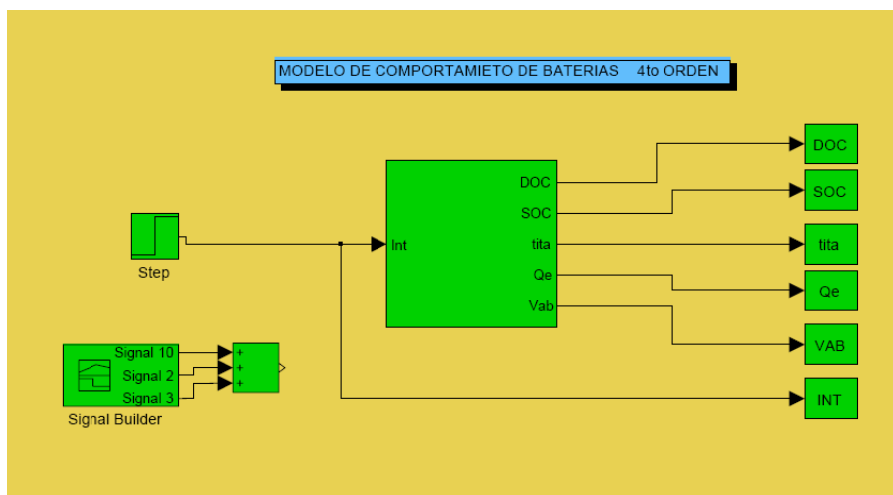
Hay que decir que hemos ajustado los parámetros que se ven en el archivo de MATLAB que vemos arriba para obtener los mejores resultados posibles en la simulación C3 (intensidad= 39,0316 A), de esta forma las simulaciones entorno a esa corriente serán lo mas exactas posibles.

En cuanto a la simulación de carga no hemos podido resolver un problema de bucle numérico que aparece en el modelo al conectar la rama parásita, debido a la falta de tiempo para seguir trabajando con el modelo de 4^{to} orden.

También hay que decir que hemos tenido problemas con el modelo, ya que se producían retrasos (las variables tardaban unos segundos en tomar un valor) que conllevaba a que se parase la simulación porque el modelo no tenia valores de las variables con los que empezar a calcular todos los otros parámetros. En concreto, donde teníamos problemas era en la ecuación diferencial de la temperatura, porque la potencia interna de la batería P1 no tomaba ningún valor hasta pasado un determinado tiempo, por lo que hemos tenido que hacer una introducción de valor manual para los primeros segundos.

A continuación describimos como se regula el modelo para indicarle la intensidad de descarga/carga.

Primero debemos abrir el modelo, como se puede apreciar en la figura siguiente.



Modelo implementado en SIMULINK

En la barra de herramientas superior viene una pequeña pantalla donde introduciremos el tiempo que tarda la simulación de descarga (el mismo que los ensayos).

Por último pulsamos en el botón  y la simulación comenzará.



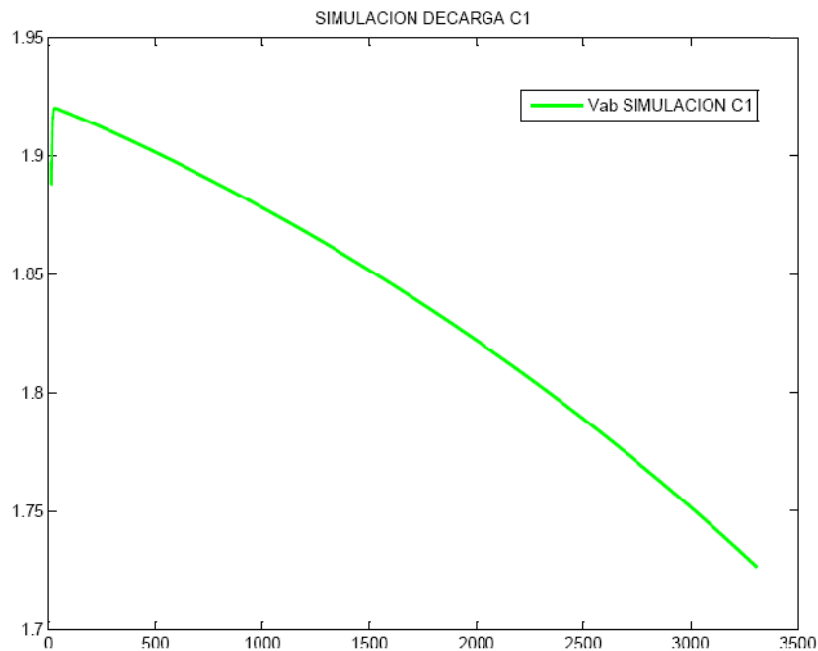
b) Simulaciones de carga y descargas realizadas

Como con el modelo de tercer orden nos hemos centrado en las descargas a intensidades bajas, con este modelo de cuarto orden hemos preferido ajustar al máximo los parámetros para descargas a intensidades elevadas. Se ha procedido a la simulación de casi todas las descargas realizadas con la batería a excepción de la descarga C100, 10 A y C10, es decir las de menor intensidad.

Hay que destacar que este modelo representa la curva de caída de tensión inicial que se da en las baterías cuando descargamos a grandes intensidades, a continuación se podrá ver en las gráficas.

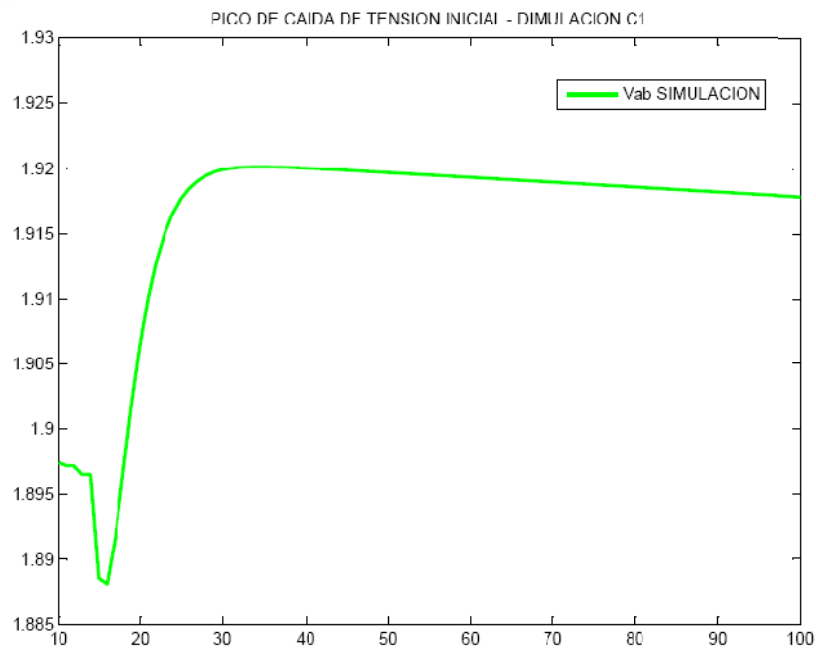
A continuación se presentan los resultados obtenidos:

SIMULACION DESCARGA C1



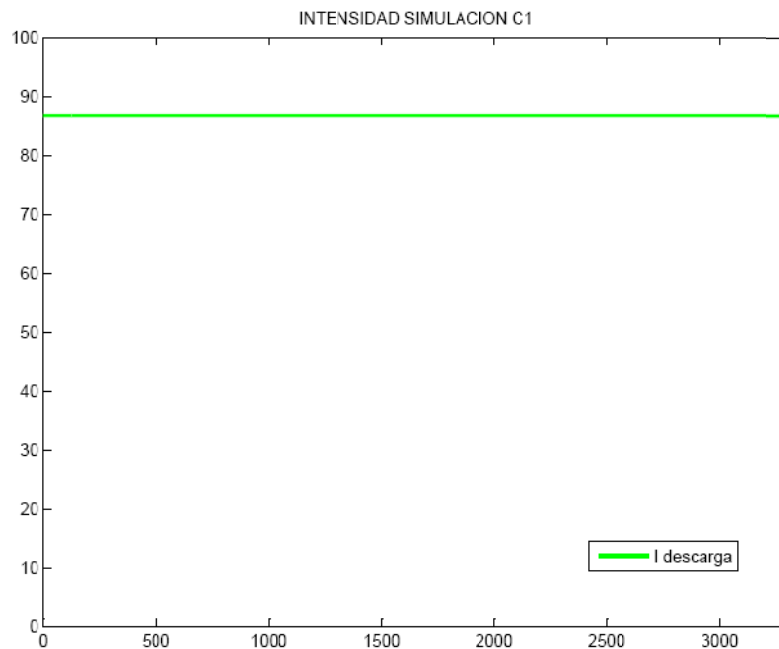
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como varía la tensión en bornes en función del tiempo cuando la batería se está descargando a casi 87 A. Se puede apreciar la caída de tensión inicial que este modelo saca.



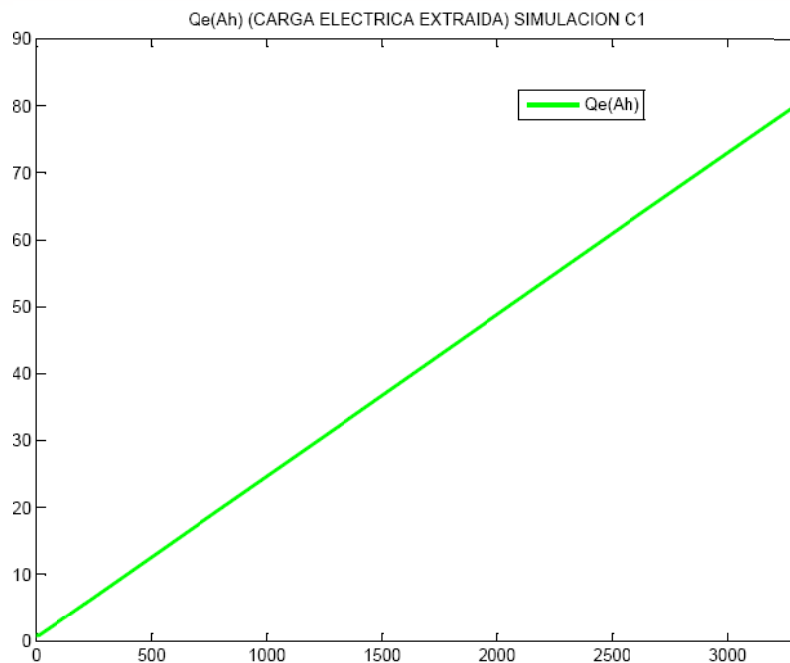
Pico de caída de tensión inicial que se obtiene con el modelo

Se puede observar en la gráfica anterior como al conectar una carga tan elevada se produce una caída de tensión muy pronunciada que es recuperada rápidamente. Se puede ver que al iniciar la descarga el modelo lleva un retraso, por eso Vab comienza a tomar valor a partir de los 10 segundos.



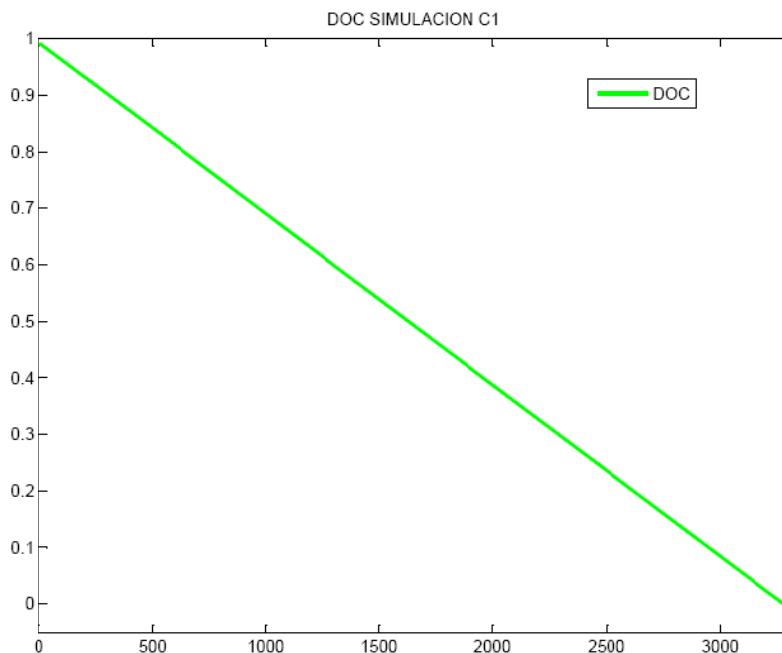
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 86,684 A.



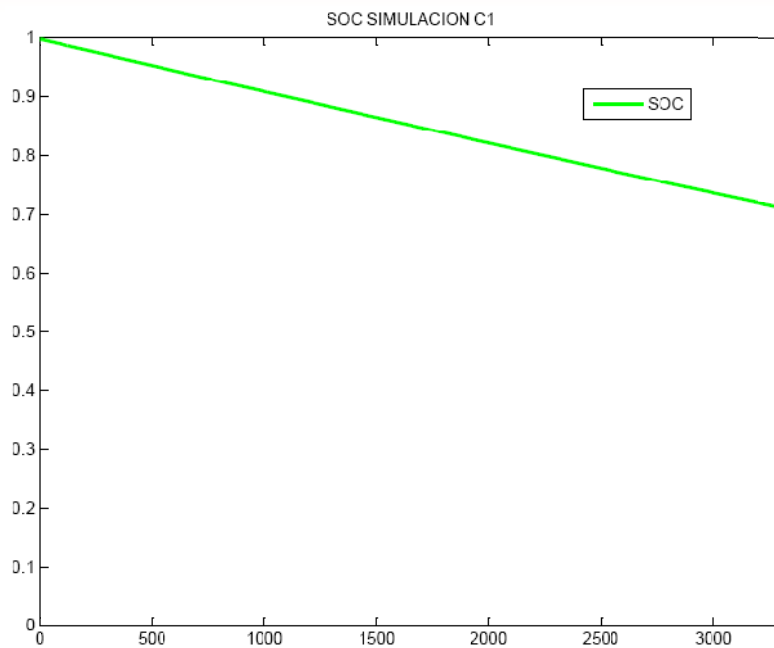
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



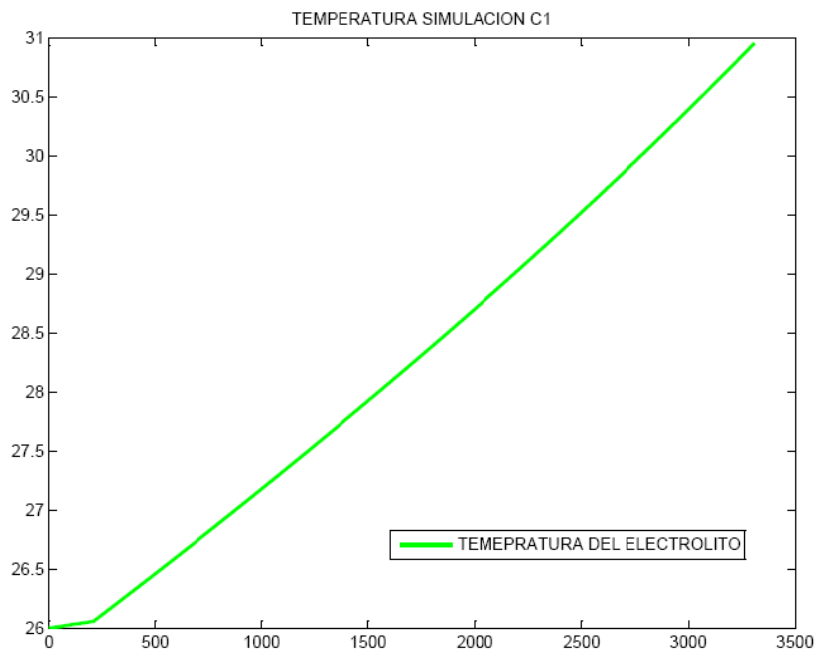
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=3309$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 71% de su capacidad máxima.

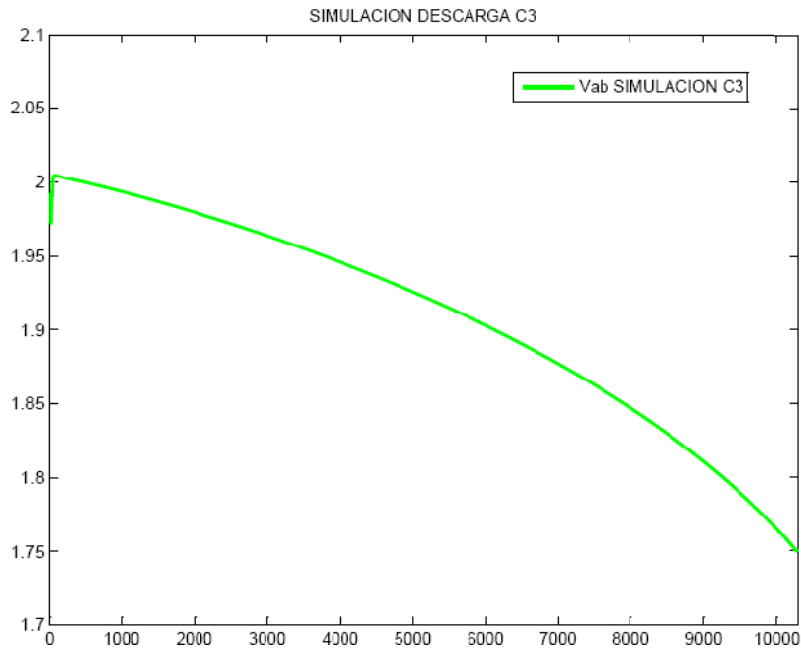


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como difiere bastante de las gráficas obtenidas con el modelo de tercer orden. Esto sucede porque el modelo térmico considerado es diferente. Vemos que se alcanza una temperatura final de más de 30° C.

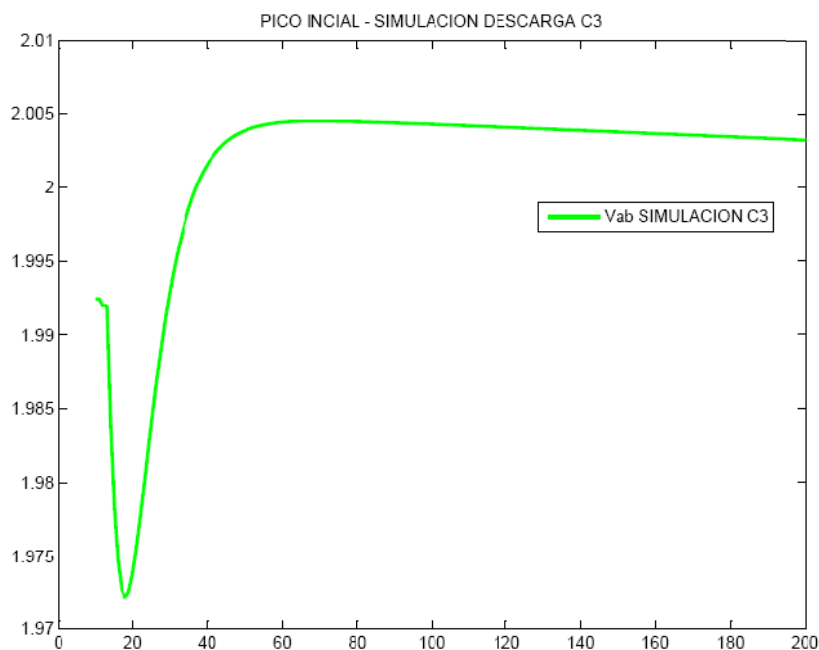


SIMULACION DESCARGA C3



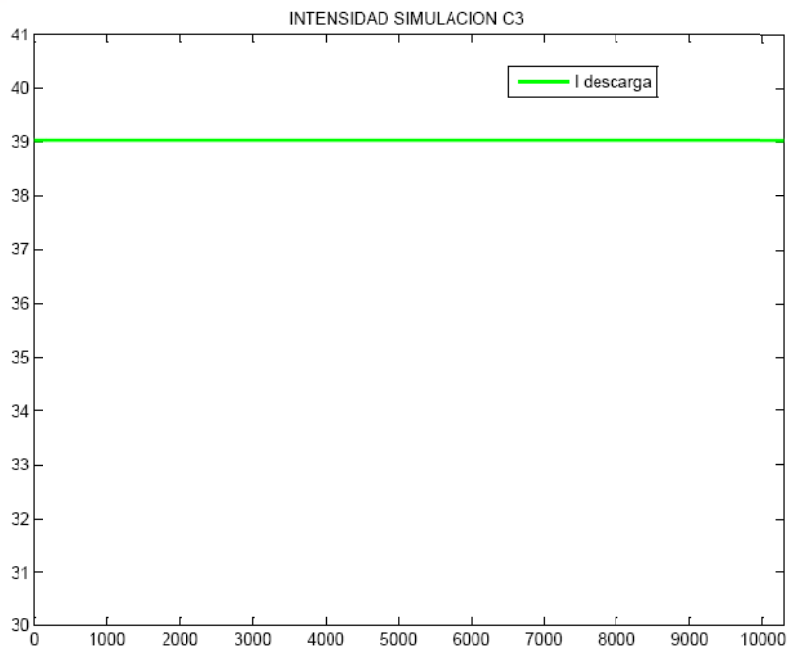
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como varia la tensión en bornes en función del tiempo cuando la batería se está descargando a 39 A aproximadamente. Se puede apreciar la caída de tensión inicial que este modelo saca.



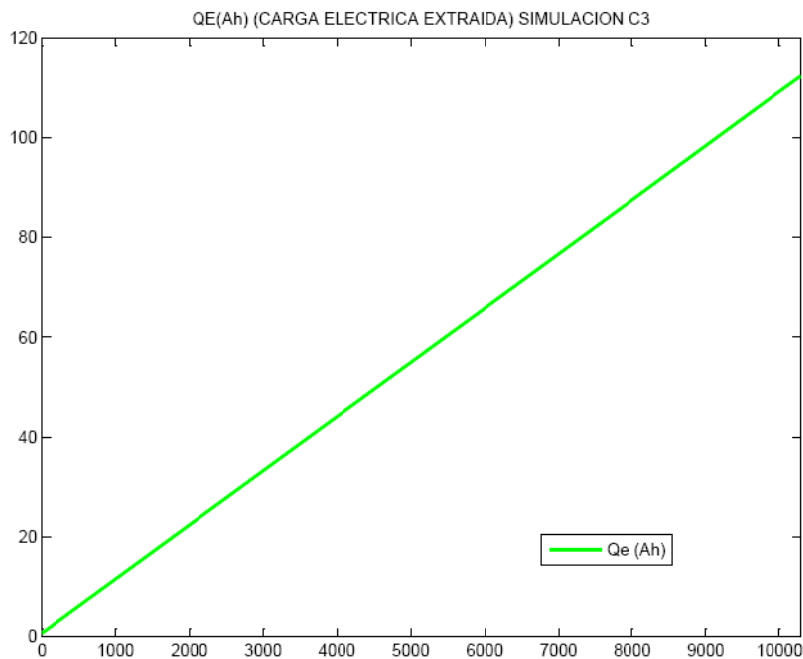
Pico de caída de tensión inicial que se obtiene con el modelo

Se puede observar en la gráfica anterior como al conectar una carga tan elevada se produce una caída de tensión muy pronunciada que es recuperada rápidamente. Se puede ver que al iniciar la descarga el modelo lleva un retraso, por eso V_{ab} comienza a tomar valor a partir de los 10 segundos.



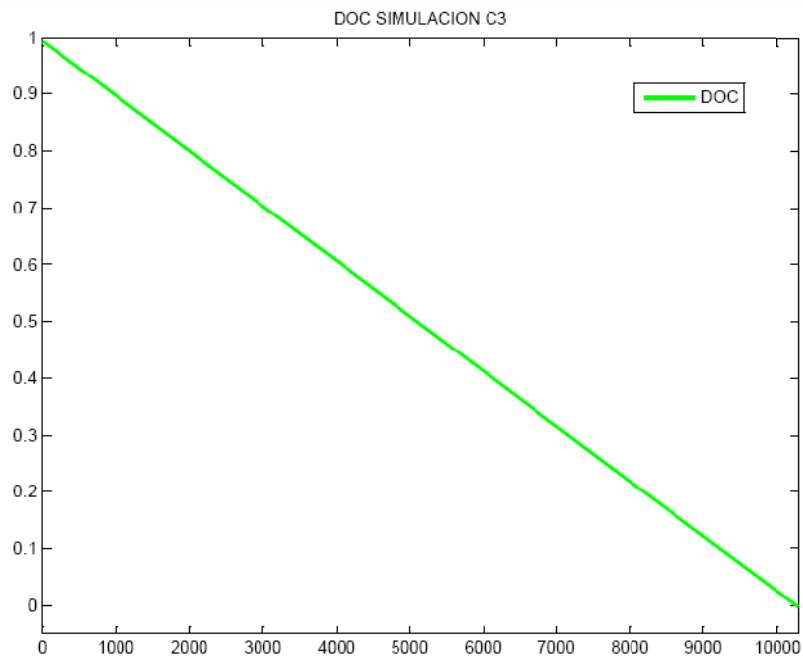
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto su valor es constante, e igual a 39,0316 A.



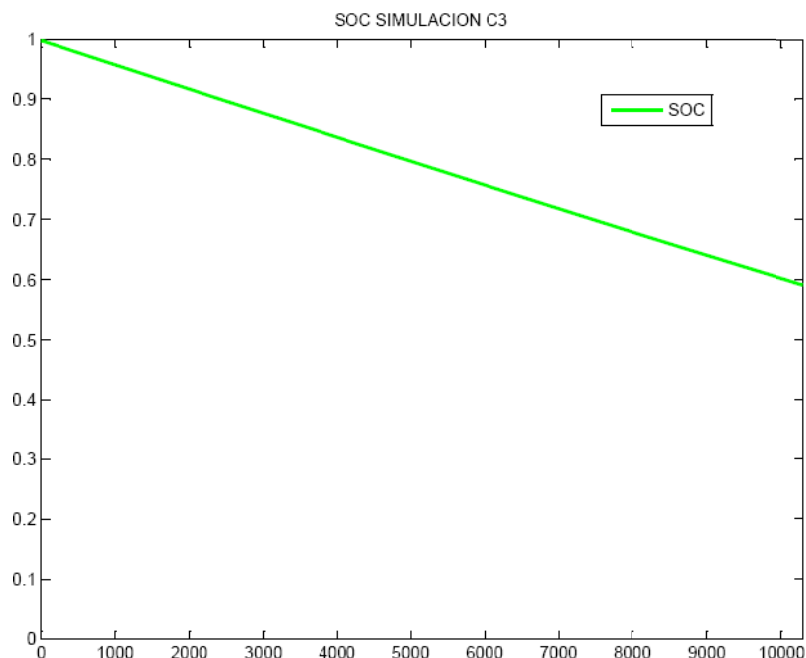
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



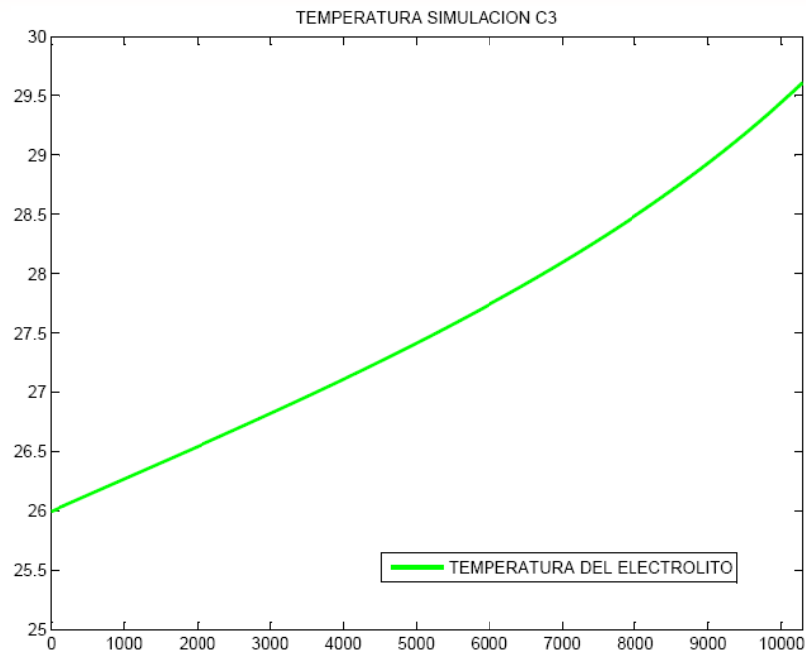
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=10280$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 59% de su capacidad máxima.

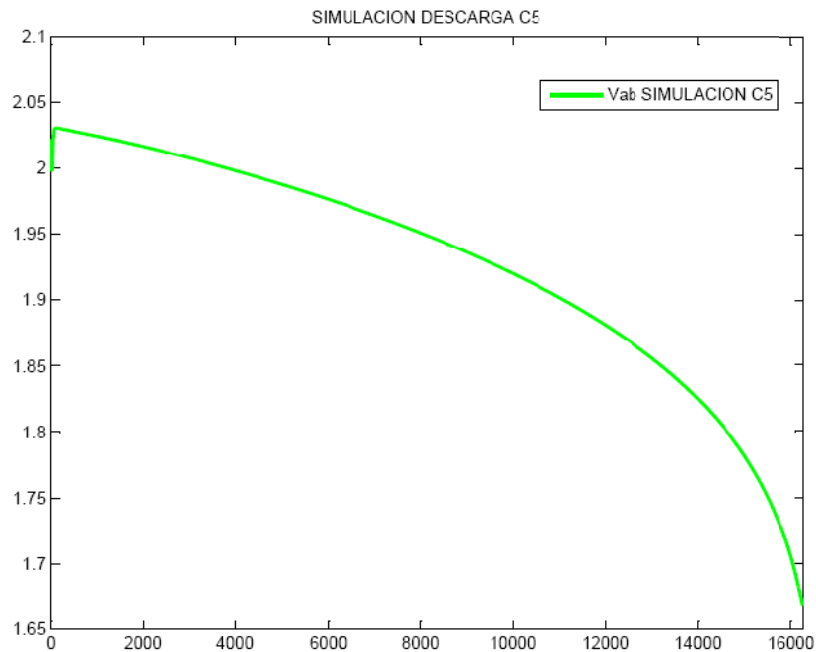


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como difiere bastante de las gráficas obtenidas con el modelo de tercer orden. Esto sucede porque el modelo térmico considerado es diferente. Vemos que se alcanza una temperatura final de 29,6° C menos que en la descarga C1, algo que es lógico esperar, porque la intensidad es menor.

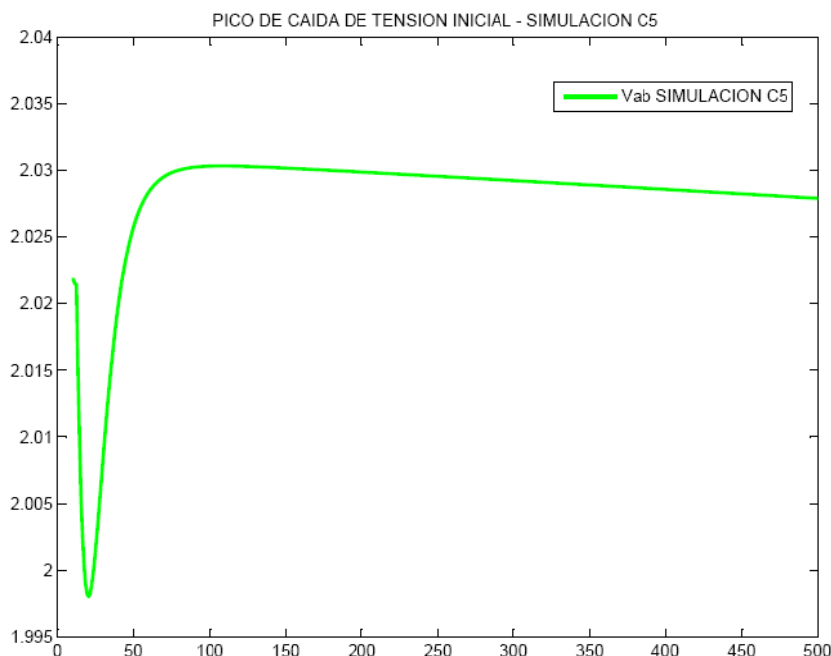


SIMULACION DESCARGA C5



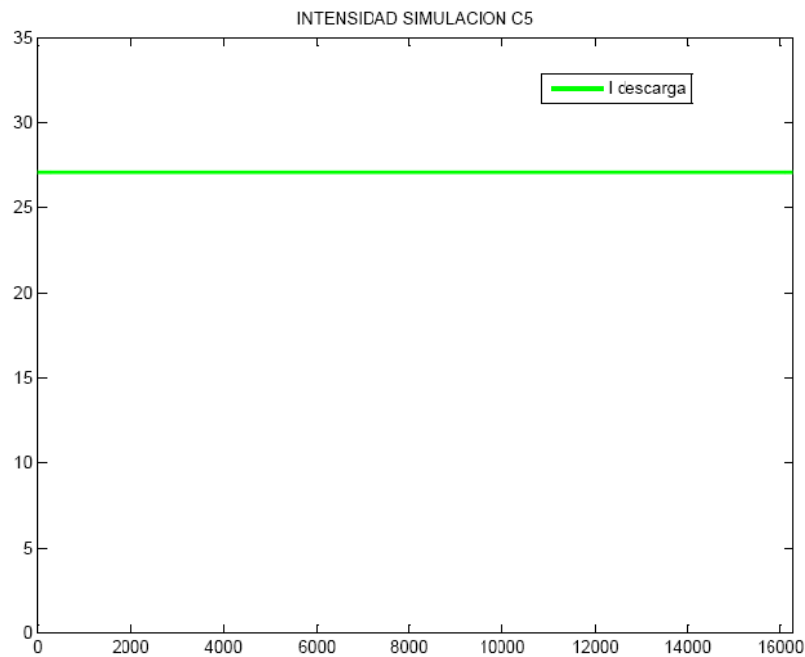
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como varia la tensión en bornes en función del tiempo cuando la batería se está descargando a 27 A aproximadamente. Se puede apreciar la caída de tensión inicial que este modelo saca.



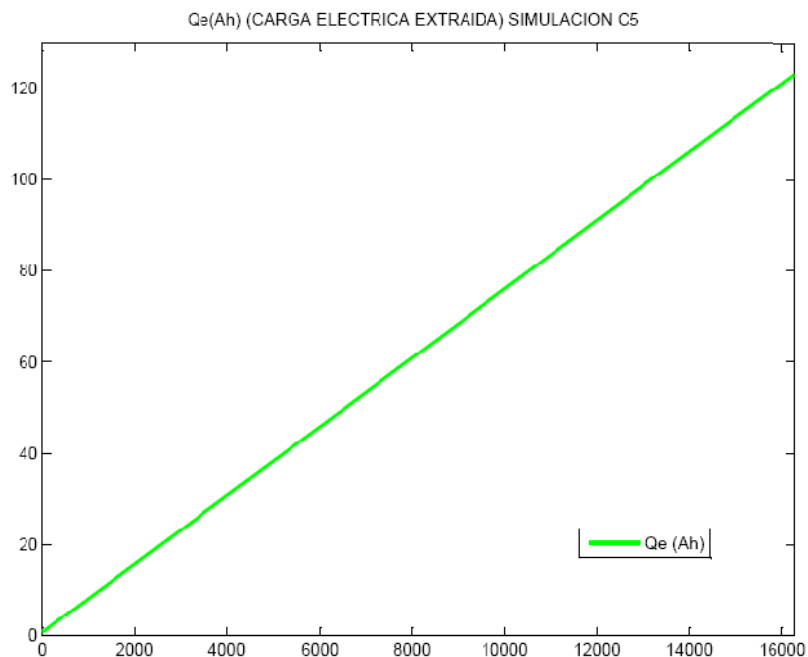
Pico de caída de tensión inicial que se obtiene con el modelo

Se puede observar en la gráfica anterior como al conectar una carga tan elevada se produce una caída de tensión muy pronunciada que es recuperada rápidamente. Hay que aclarar que el modelo exagera un poco esta caída inicial en la tensión, esto lo comprobaremos más adelante en el punto 5.2.



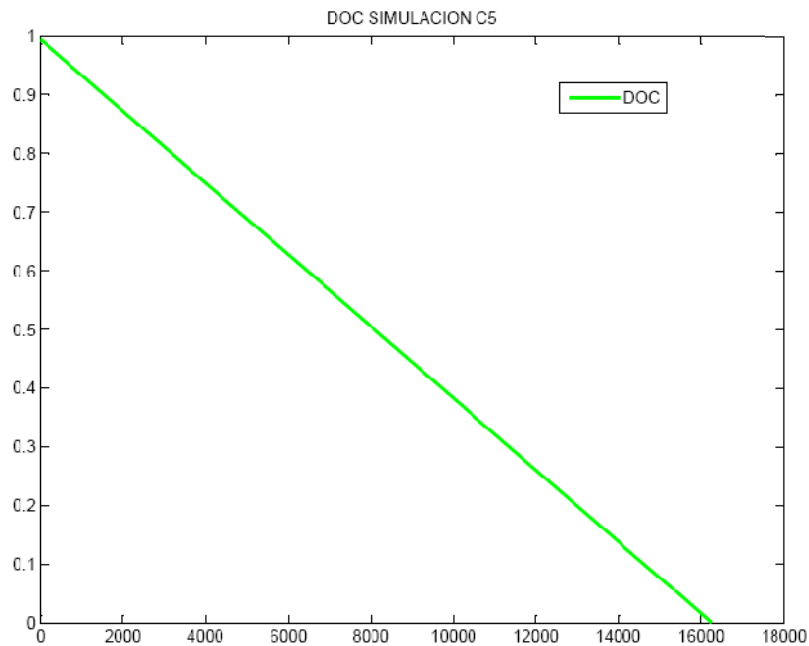
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 27,0868 A.



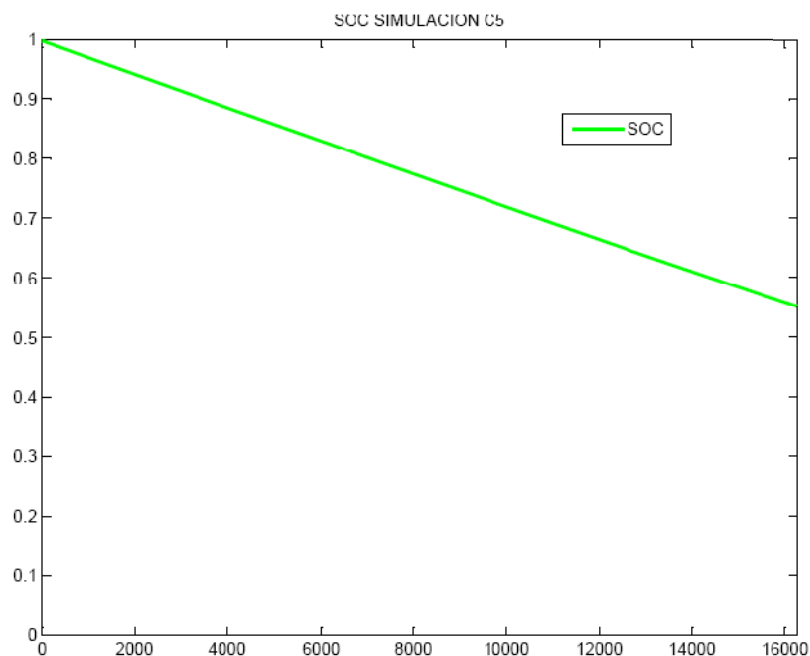
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



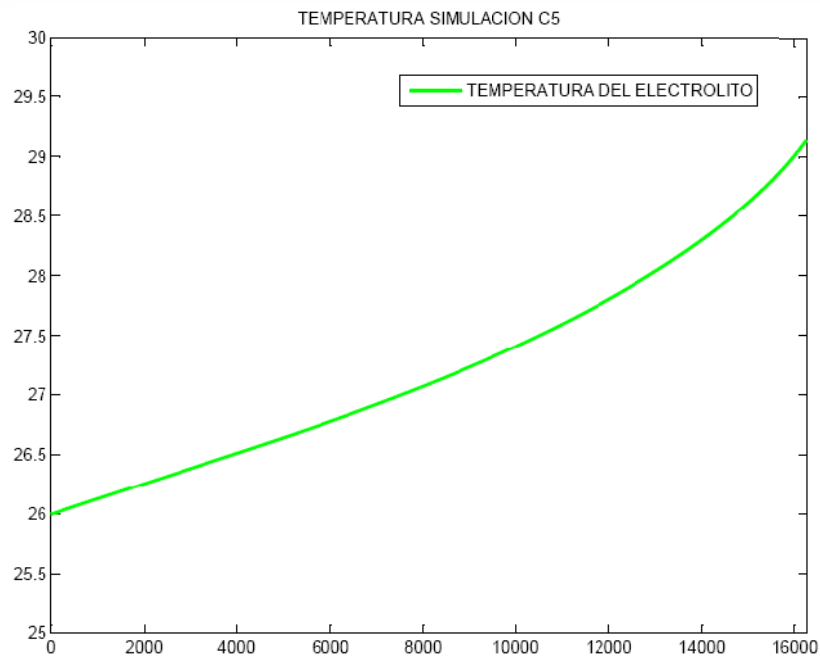
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=16250$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 55% de su capacidad máxima.

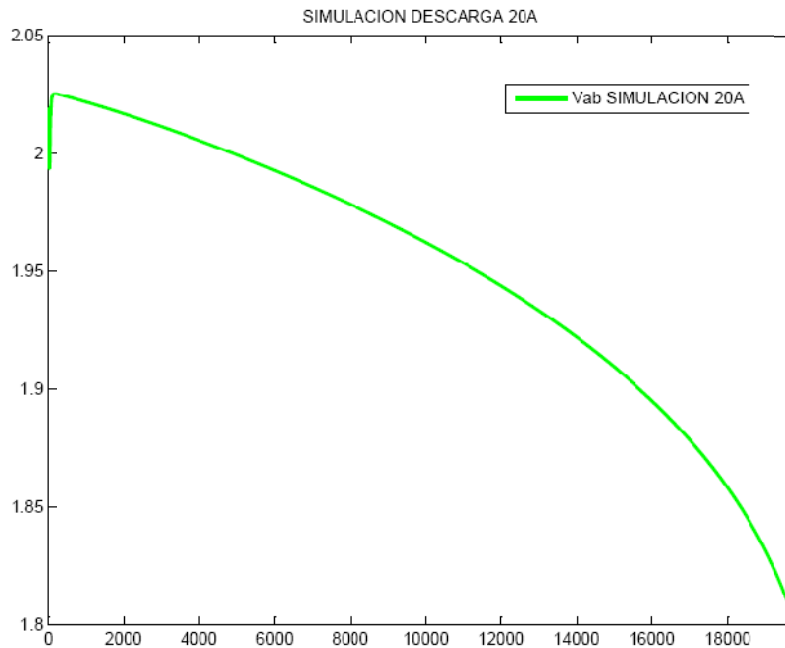


Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como difiere bastante de las gráficas obtenidas con el modelo de tercer orden. Esto sucede porque el modelo térmico considerado es diferente. Vemos que se alcanza una temperatura final de más de 29° C menos que en la descarga C1 y que en la descarga C3, algo que es lógico esperar, porque la intensidad es menor.

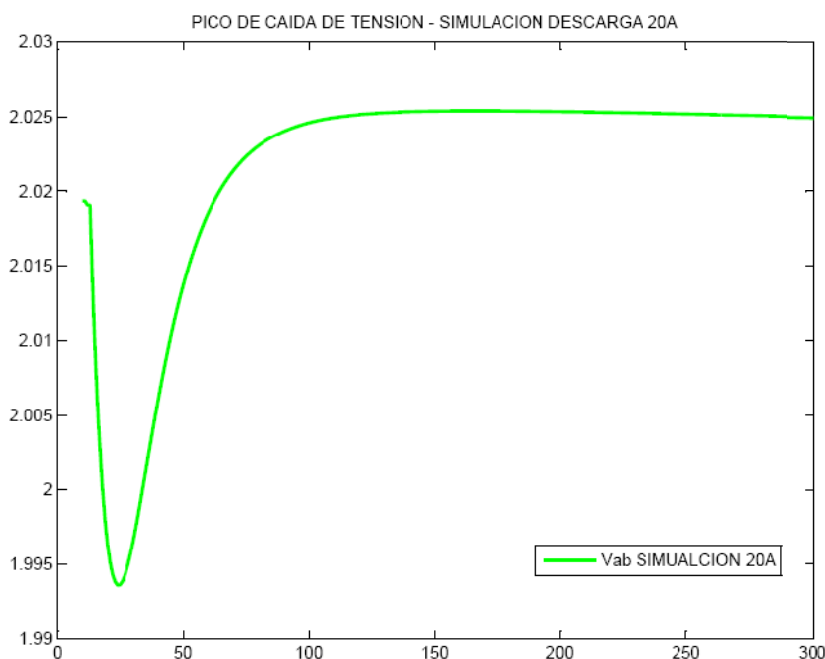


SIMULACION DESCARGA 20A



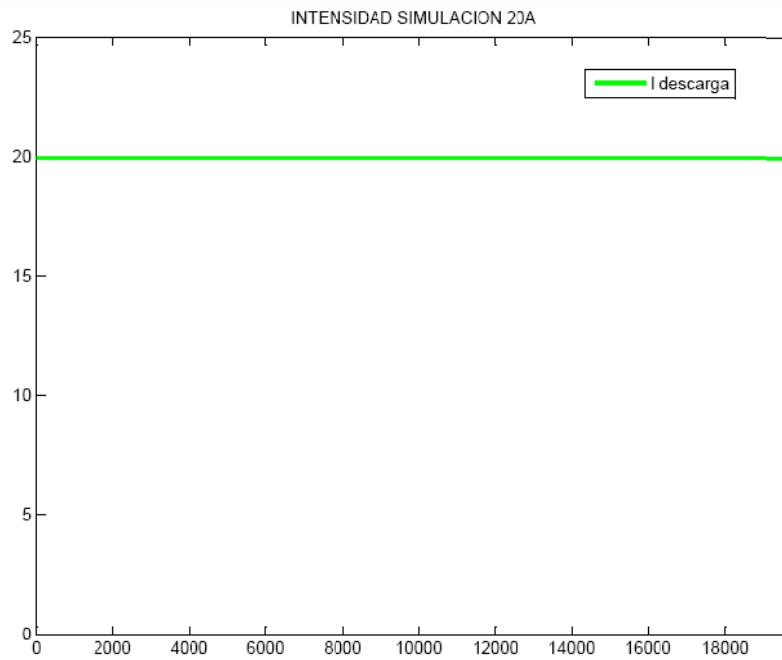
Variación de la tensión de la batería en función del tiempo

En esta gráfica podemos ver como varía la tensión en bornes en función del tiempo cuando la batería se está descargando a 20 A aproximadamente. Se puede apreciar la caída de tensión inicial que este modelo saca.



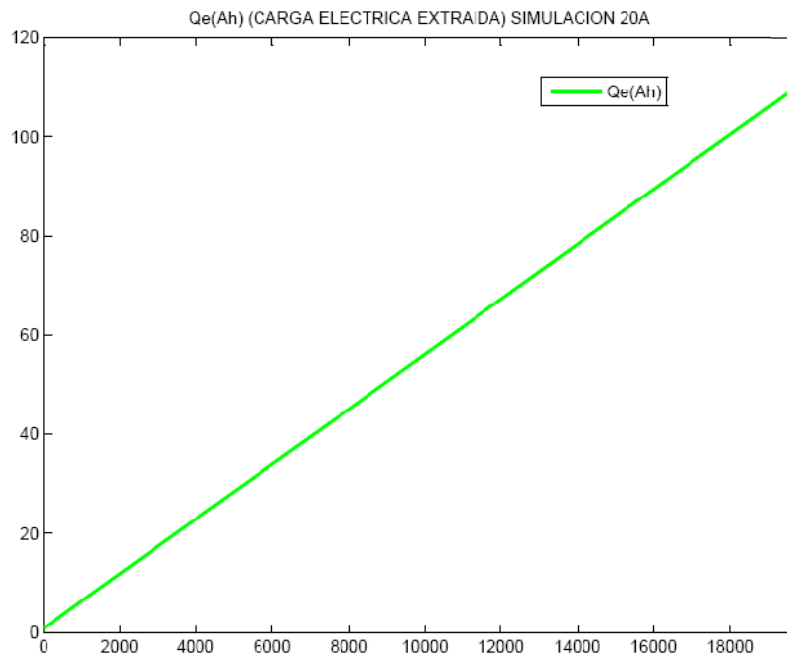
Pico de caída de tensión inicial que se obtiene con el modelo

Se puede observar en la gráfica anterior como al conectar una carga tan elevada se produce una caída de tensión muy pronunciada que es recuperada rápidamente. Se puede ver que al iniciar la descarga el modelo lleva un retraso, por eso Vab comienza a tomar valor a partir de los 10 segundos.



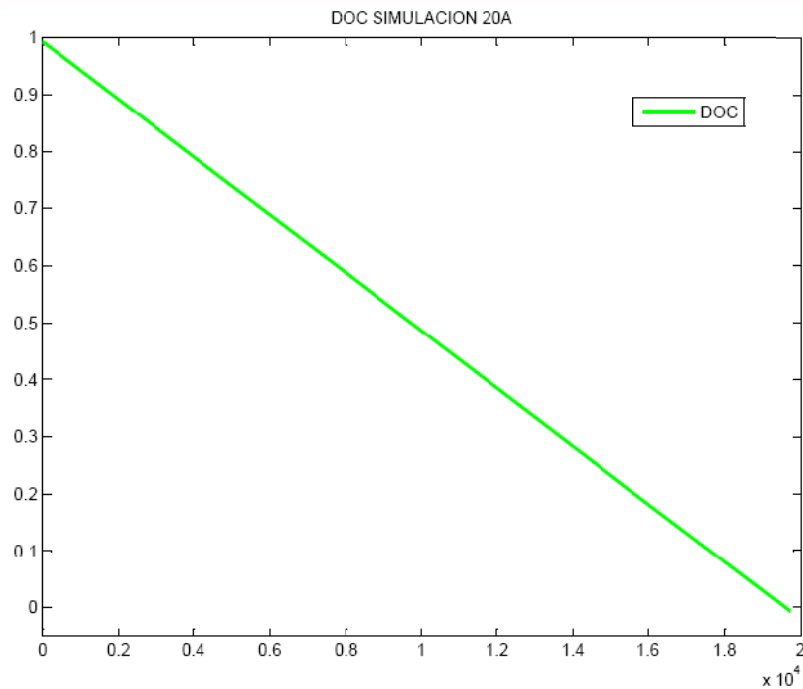
Variación de la intensidad en función del tiempo

En cuanto a la intensidad, es un parámetro que le metemos al modelo, por lo tanto lo su valor es constante, e igual a 19,9443 A.



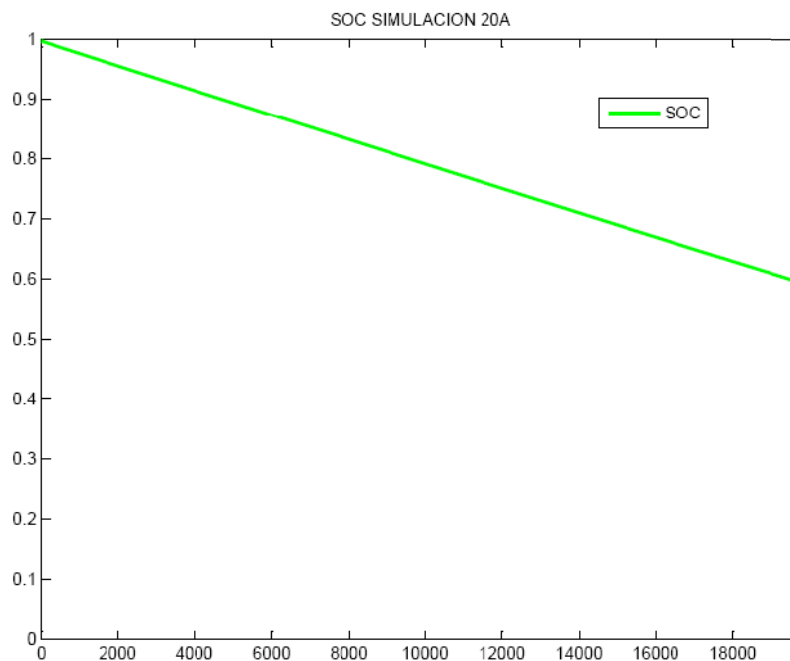
Variación de la carga eléctrica extraída en función del tiempo

Como podemos observar en este gráfico la carga eléctrica extraída varía de forma lineal con el tiempo, porque al ser la intensidad constante y multiplicar la intensidad por el tiempo nos da un valor proporcional al tiempo.



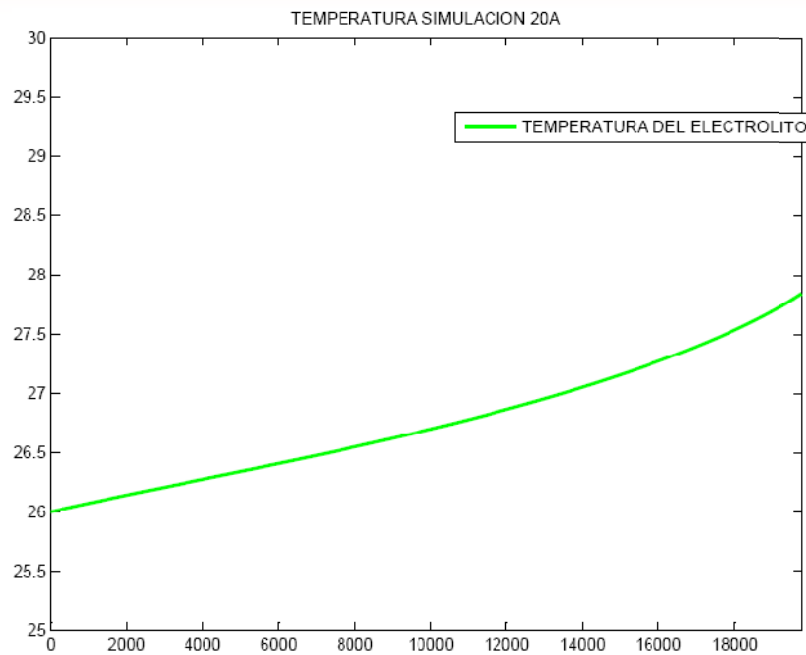
Variación del parámetro DOC durante el ensayo

Como podemos ver en el gráfico anterior la batería se descarga completamente en el ensayo, porque $DOC=0$ en el tiempo $T=10280$ seg. Cuando dejamos de descargar la batería. También se aprecia que la variación es lineal, esto es porque la batería se descarga a intensidad constante, es decir a la mitad del tiempo la batería tendrá el 50% de carga.



Variación del parámetro SOC durante el ensayo

En cuanto al parámetro SOC, State of Charge, podemos decir que la batería se ha descargado aproximadamente hasta un 59% de su capacidad máxima.



Variación de la temperatura durante el ensayo

En esta gráfica de temperatura podemos ver como difiere bastante de las gráficas obtenidas con el modelo de tercer orden. Esto sucede porque el modelo térmico considerado es diferente. Vemos que se alcanza una temperatura final de 27,8° C menos que en la descarga C1,C3 y C5, algo que es lógico esperar, porque la intensidad es menor.



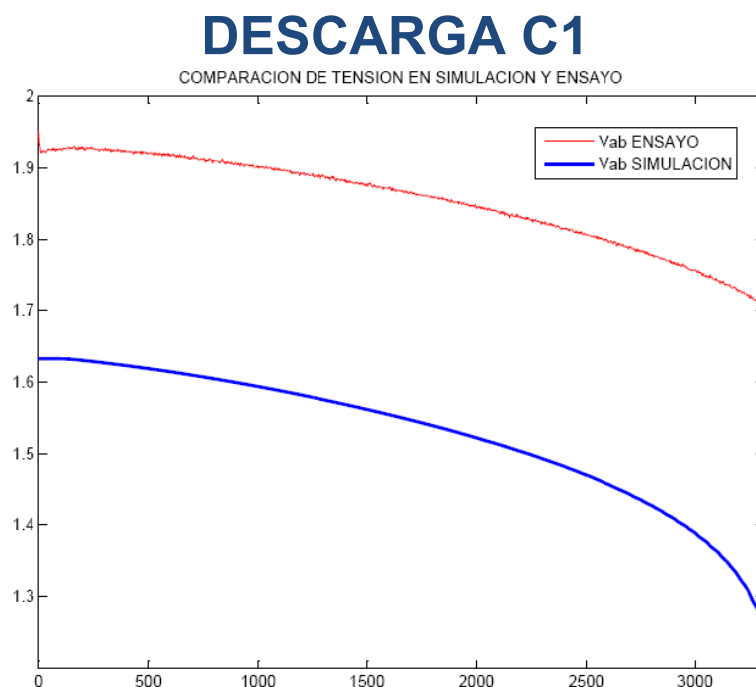
5 COMPARACION

En este apartado hablaremos de los resultados obtenidos en las simulaciones, comparándolos con los que tenemos registrados de los ensayos, así comprobaremos si el modelo responde adecuadamente. Lo realizaremos en dos apartados, en el primero de ellos compararemos las simulaciones de 3^{er} orden con los ensayos reales (apartado 5.1), en el otro apartado (5.2) compararemos las simulaciones de 4^{to} orden con los ensayos reales.

5.1 Comparación - modelo de 3er orden

Como indica el título en este apartado procederemos a comparar los resultados obtenidos en las simulaciones de tercer orden con los ensayos reales. Hay que señalar que el modelo de tercer orden no consigue buenos resultados para márgenes amplios de corriente, es decir que si queremos tener una buena respuesta del modelo debemos limitar las simulaciones a un intervalo estrecho de corriente, cuanto más estrecho sea menor será el error que cometemos en las simulaciones. Comentaremos más respecto a estos márgenes en el apartado 6.1 de conclusiones.

A continuación se pueden ver las comparaciones de las diferentes descargas y de la carga de la batería:



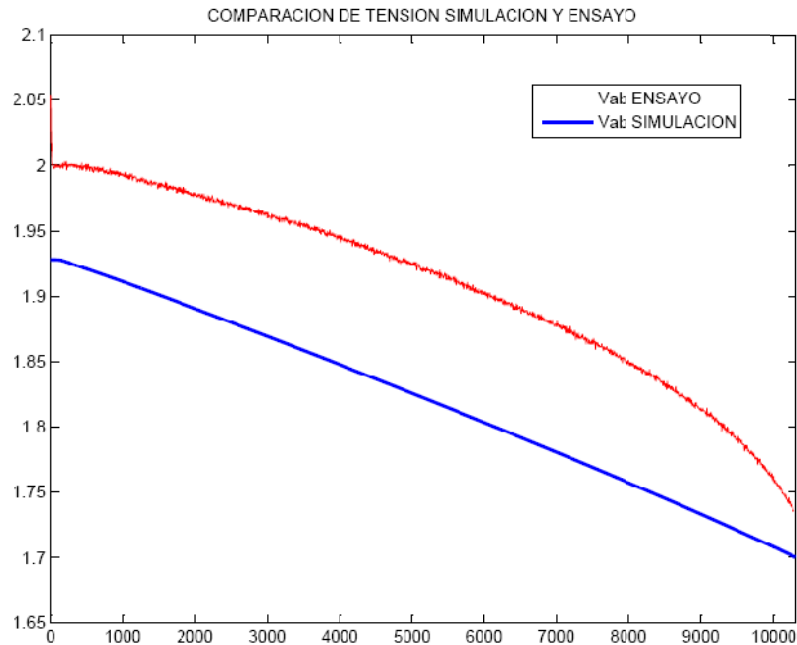
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Vemos en la gráfica que la simulación, provoca una caída de tensión mucho más exagerada que la real, aunque la curvatura sí que se aproxima bastante, si la curva estuviese más arriba sería bastante bueno. No se han representado los demás parámetros, porque no se ha considerado de interés. Error máximo = 20%, este error



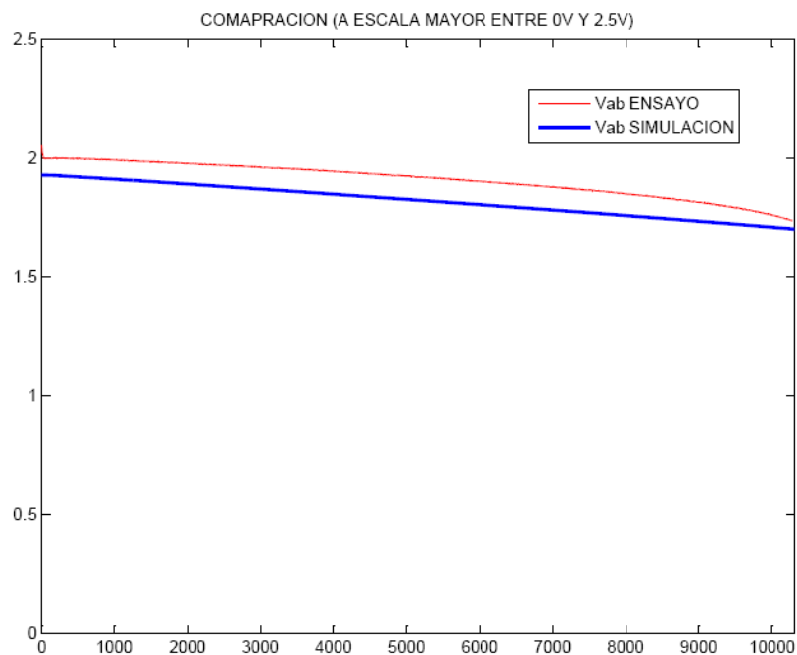
es muy elevado no se puede decir que el modelo representa el comportamiento de la batería.

DESCARGA C3



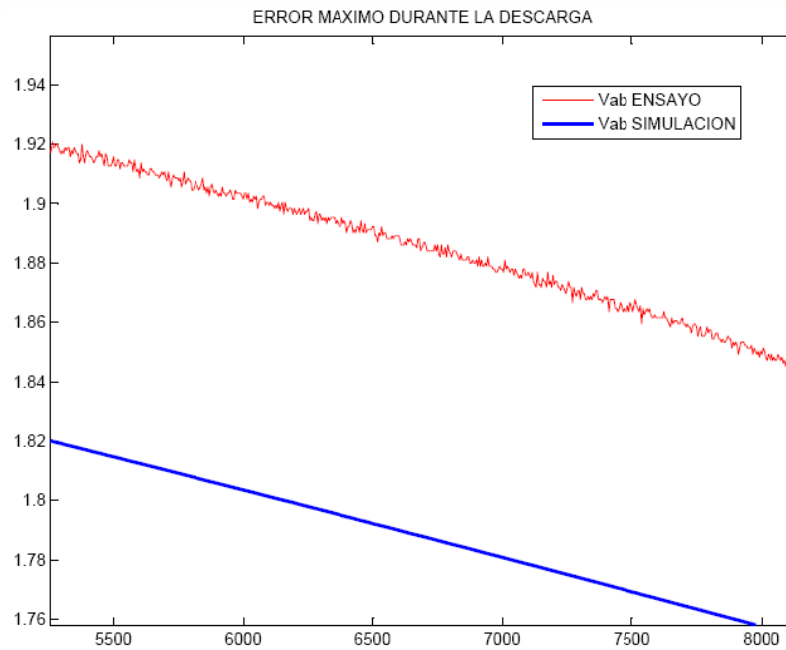
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 39 A ,más cerca de la I_n (para la que hemos ajustado el modelo), el error disminuye considerablemente. No hay una correcta curvatura.



Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de ser tan grande.

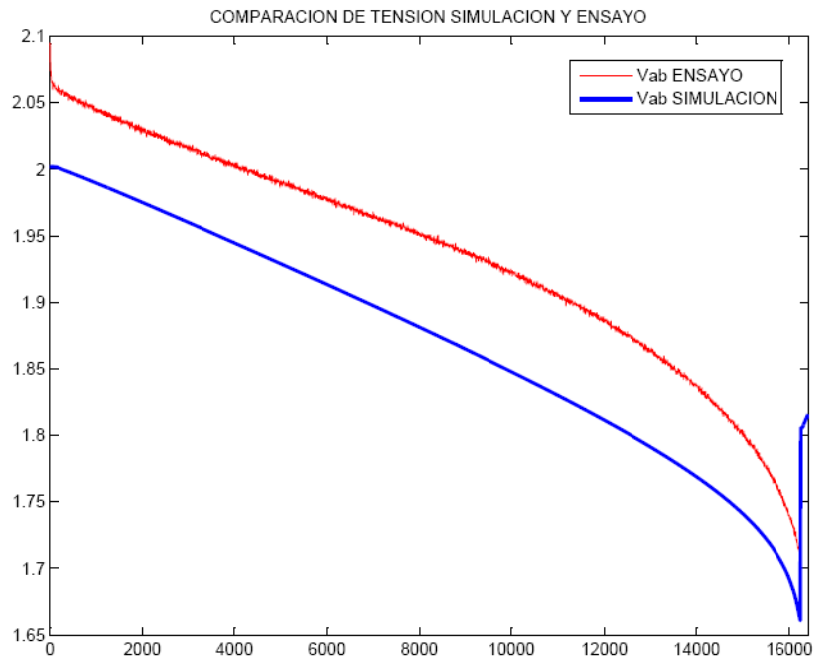


Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 5% de la tensión entre bornes nominal, bastante elevado para nuestro propósito.

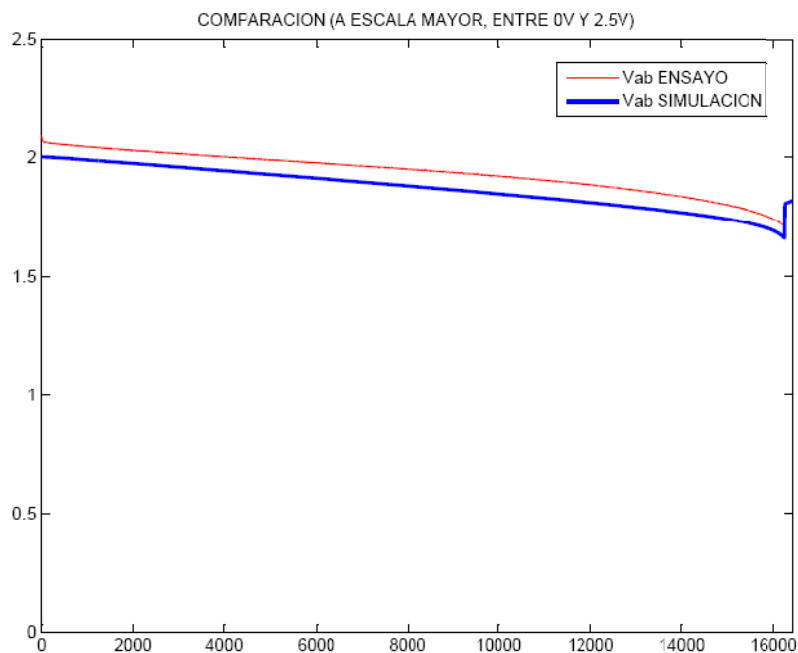


DESCARGA C5



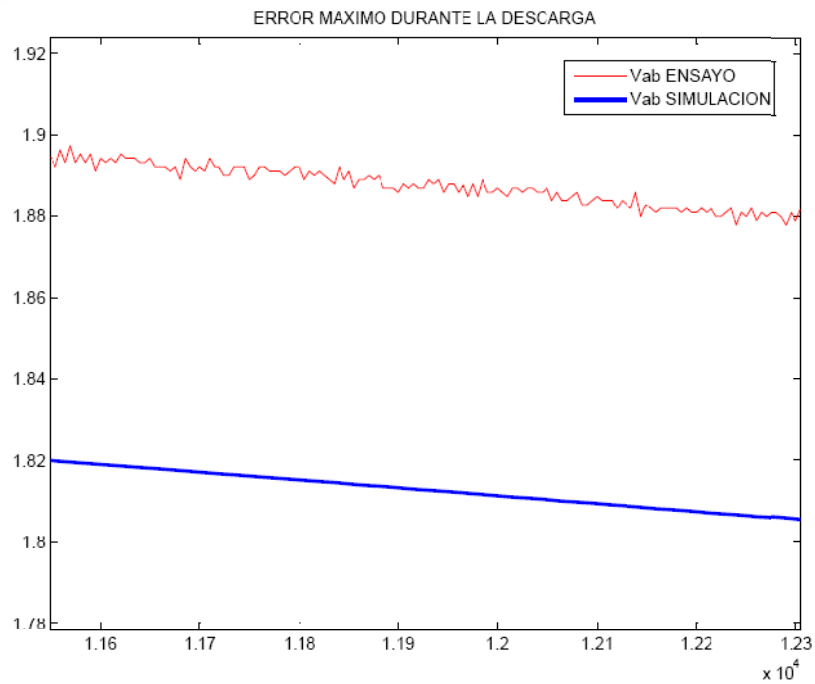
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 27 A, más cerca aún de la I_n (para la que hemos ajustado el modelo), el error disminuye. Se aprecia una buena forma de la curva que se asemeja bastante a la realidad, pero el modelo hace caer la tensión más de lo real.



Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de ser tan grande.



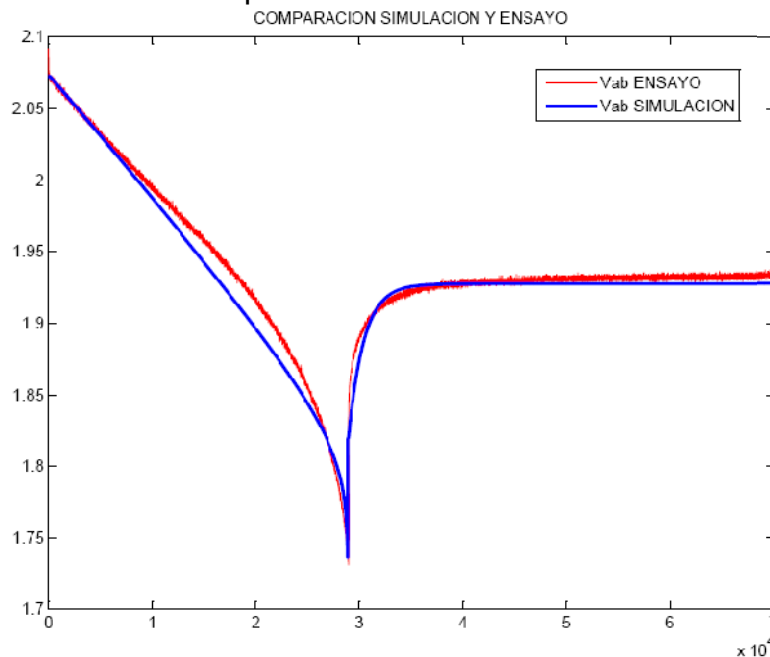
Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 3,75% de la tensión entre bornes nominal, observamos que a medida que disminuimos la intensidad de descarga acercándonos a la Intensidad nominal el error se hace cada vez más pequeño.



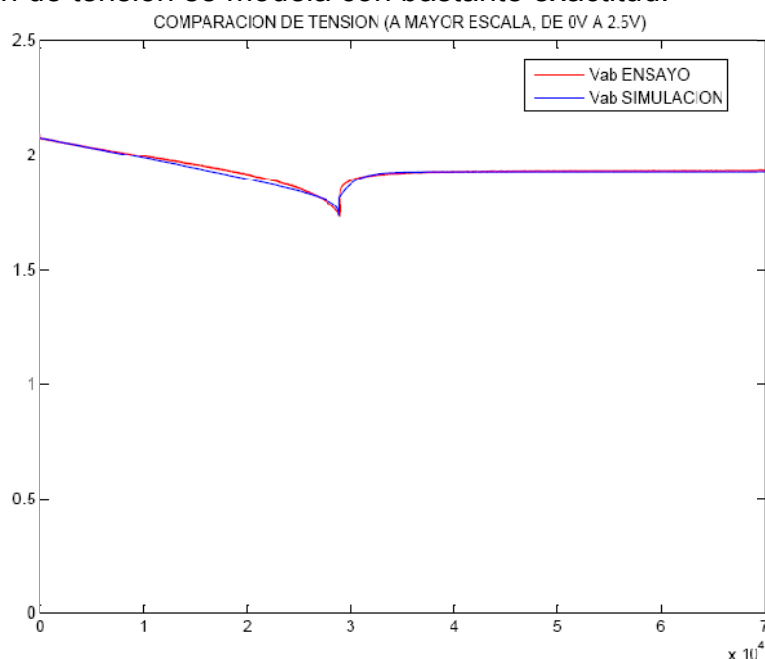
DESCARGA C10

En este caso al tratarse de la intensidad nominal de funcionamiento de la batería también se ha hecho una comparación de los demás parámetros representados en el apartado de ensayos y en el de simulaciones, solo se ha hecho en este porque estos parámetros se ajustan con bastante exactitud en todas las descargas y no tiene sentido repetirlo.



Comparación de la tensión en bornes de la batería

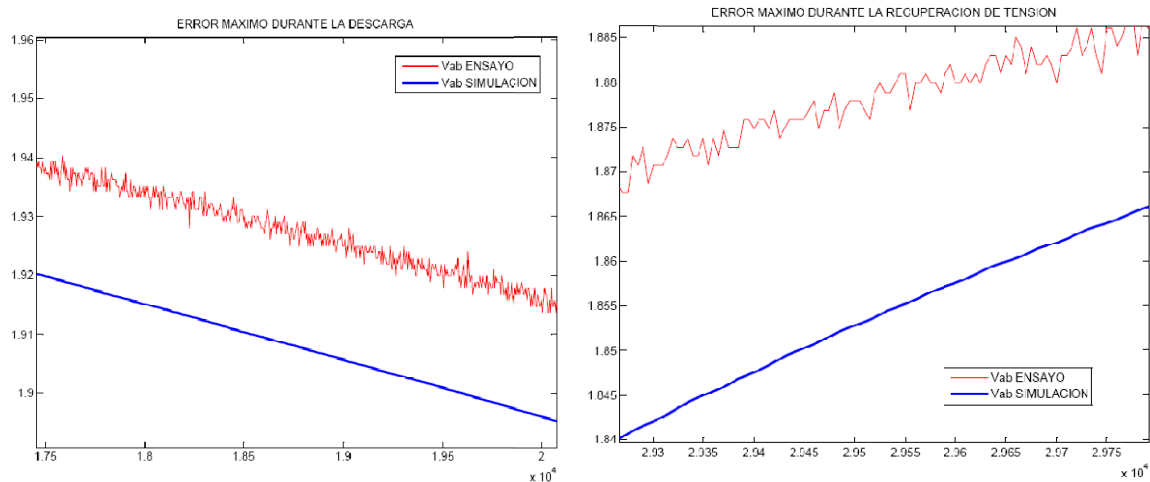
Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 15,7365 A, es decir la I_n (para la que hemos ajustado el modelo), el error se hace mínimo. Se aprecia una buena forma de la curva que se asemeja bastante a la realidad, incluso la recuperación de tensión se modela con bastante exactitud.



Comparación a mayor escala

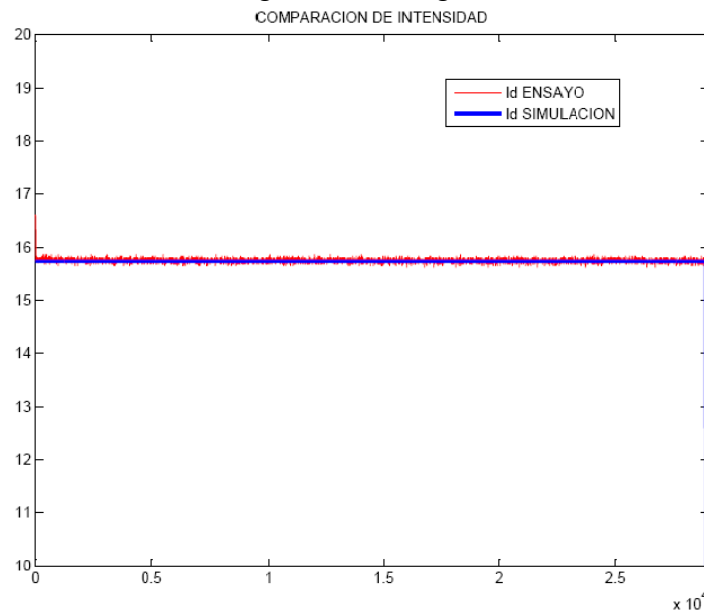


Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo a esta escala casi no se aprecian diferencias.



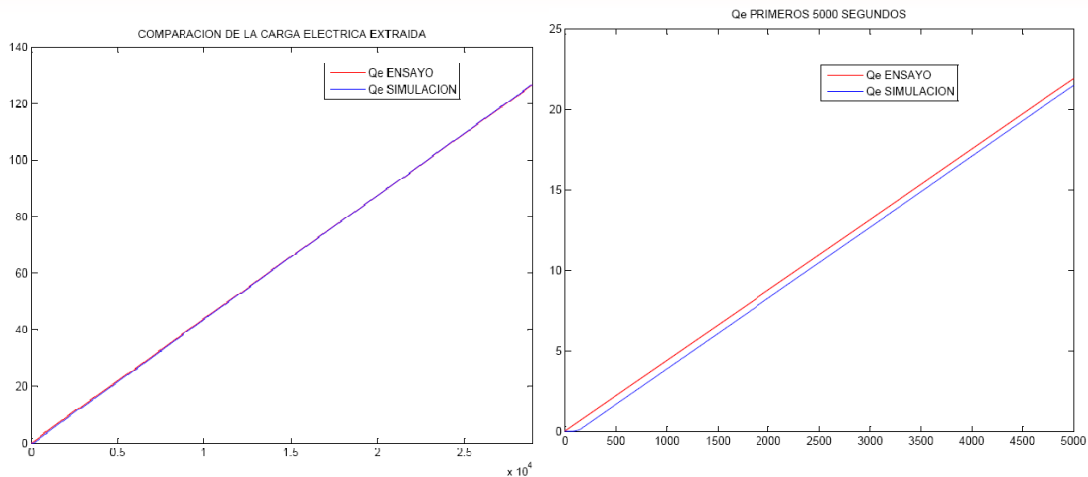
Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 0,9% de la tensión entre bornes nominal, en la recuperación de tensión el error máximo es de 1,5%. Hemos conseguido una regulación bastante buena.



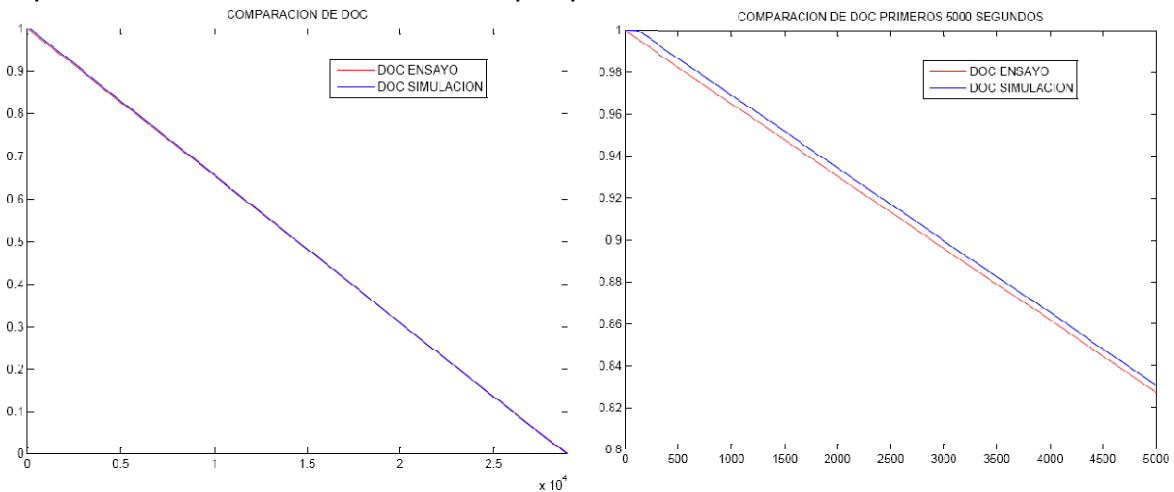
Comparación de la intensidad de descarga

Como vemos la intensidad es constante y se mantiene igual la intensidad simulada y la del ensayo, aunque la tensión registrada presenta pequeñas fluctuaciones en torno a la intensidad del ensayo.



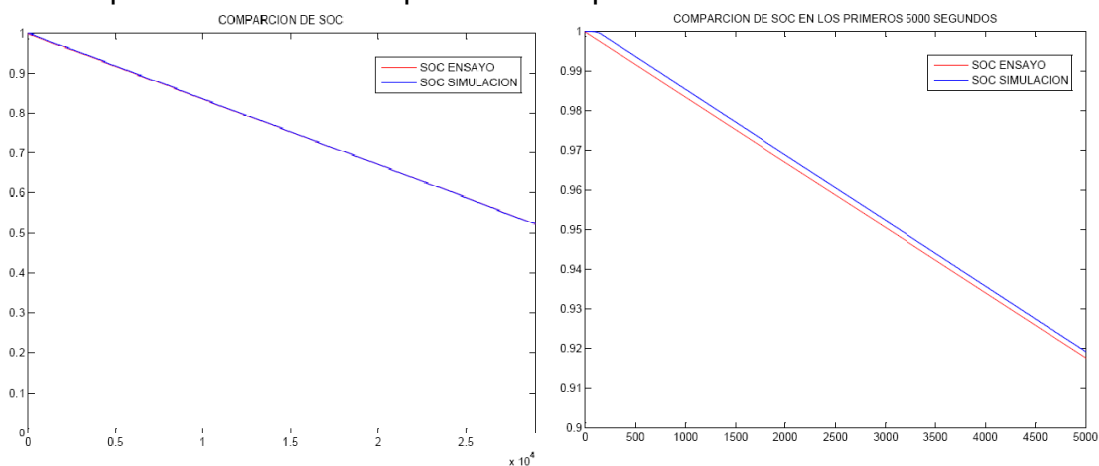
Comparación de Qe DC10 Zoom en los primeros 5000 segundos

Vemos que las rectas son prácticamente las mismas, solo se aprecia una pequeña diferencia en la gráfica ampliada de los primeros 5000 seg. Hay como un pequeño retardo en el cálculo de Qe por parte del modelo.



Comparación de DOC – Descarga C10

Se aprecia el mismo comportamiento que en Qe.

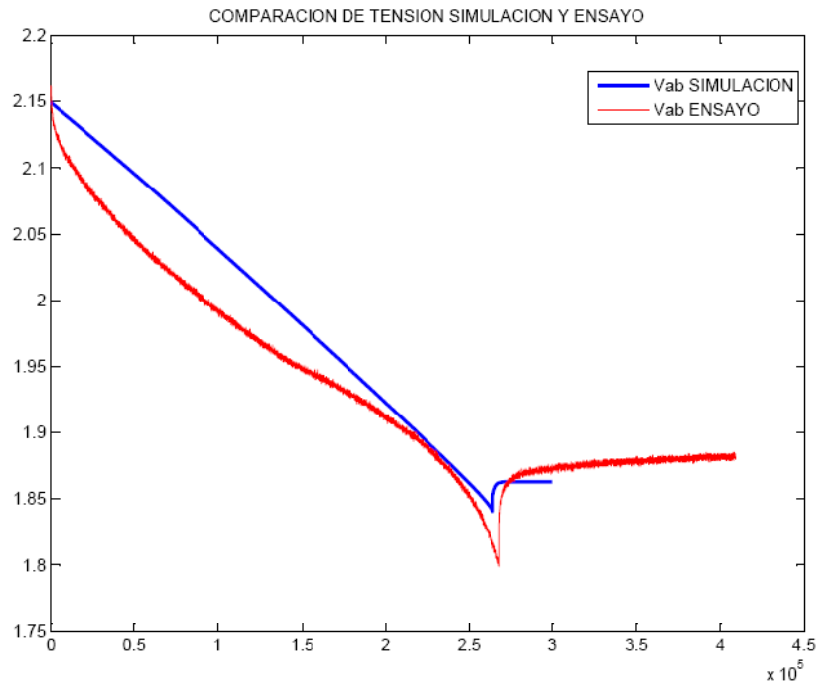


Comparación de SOC - Descarga C10

Se aprecia el mismo comportamiento que en Qe.y DOC

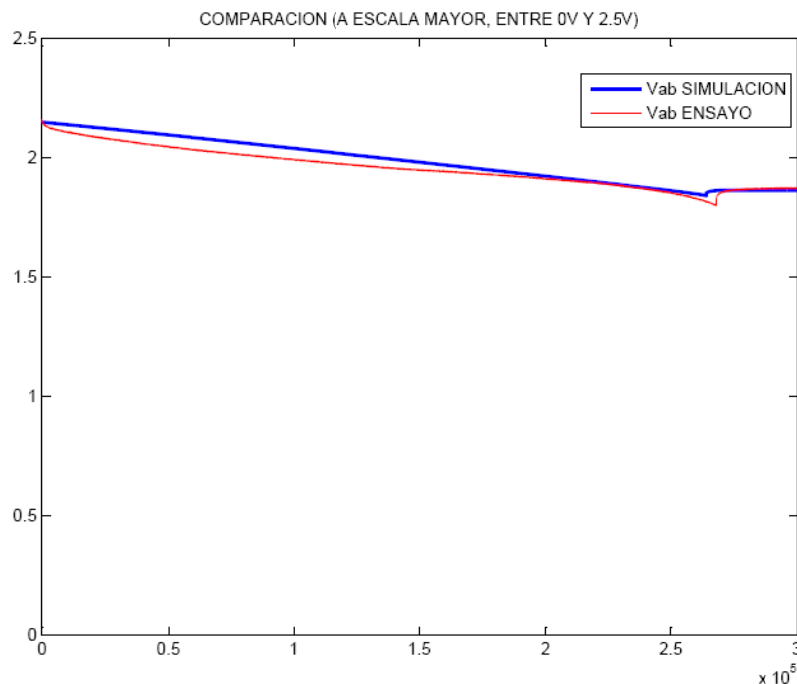


DESCARGA C100



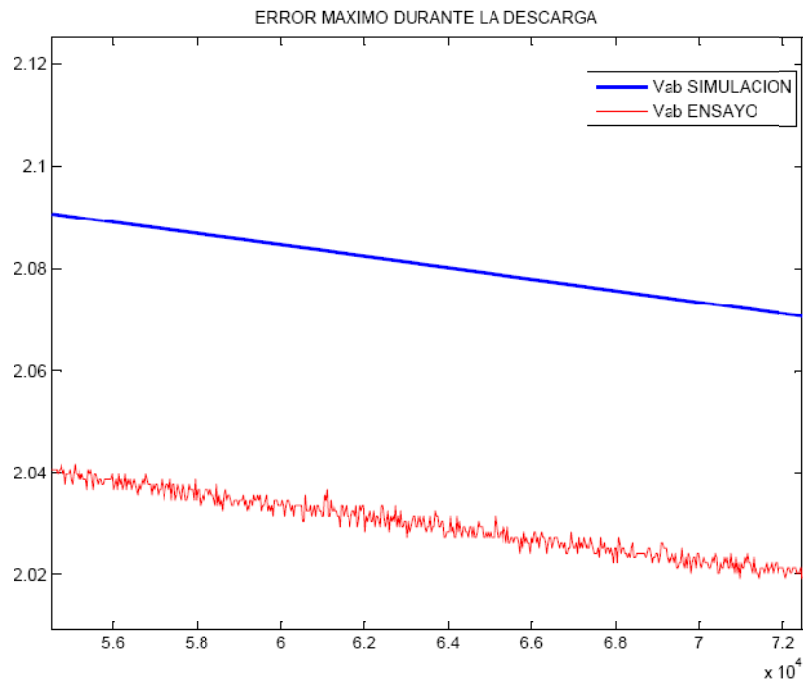
Comparación de la tensión en bornes de la batería

De esta representación gráfica podemos afirmar que la batería al descargarse tan lentamente cambia su comportamiento y el modelo no es lo suficientemente perfecto como para simular eso. Se ve que durante la descarga la curvatura de la tensión cambia de convexa a cóncava.



Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de ser tan grande, y se aparecían menos los cambios en la curvatura.



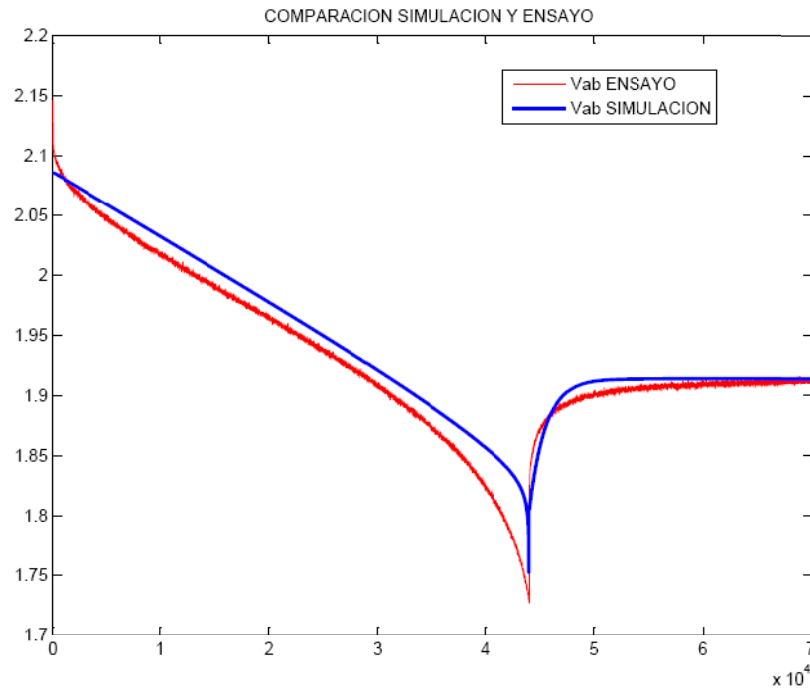
Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 2,5% de la tensión entre bornes nominal.

Observamos que ahora como estamos simulando una intensidad por debajo de la nominal, el modelo simula que la tensión es mayor que la real, justo lo contrario que sucedía a intensidades mayores de la nominal, en las que el modelo daba como resultado una tensión entre bornes menor que la real registrada.

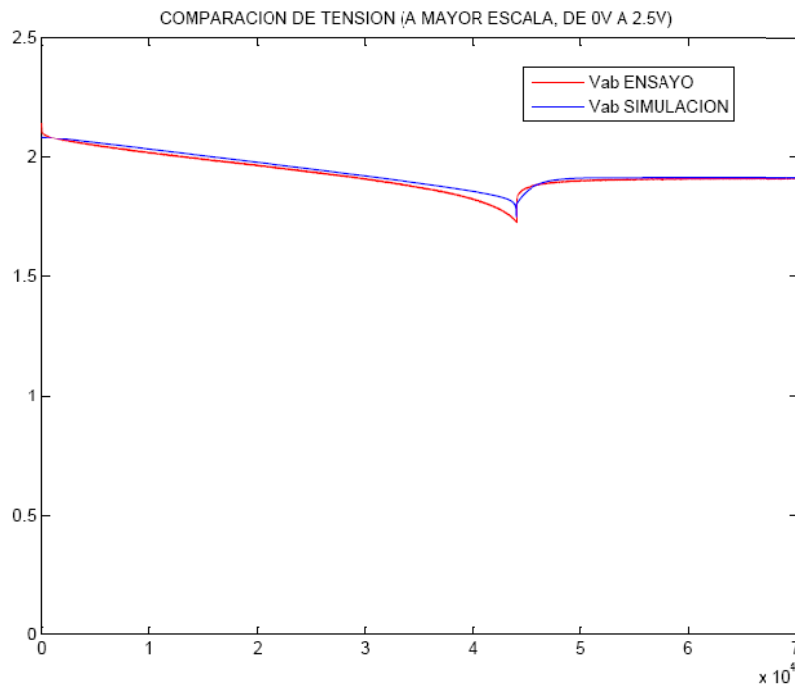


DESCARGA 10Amp



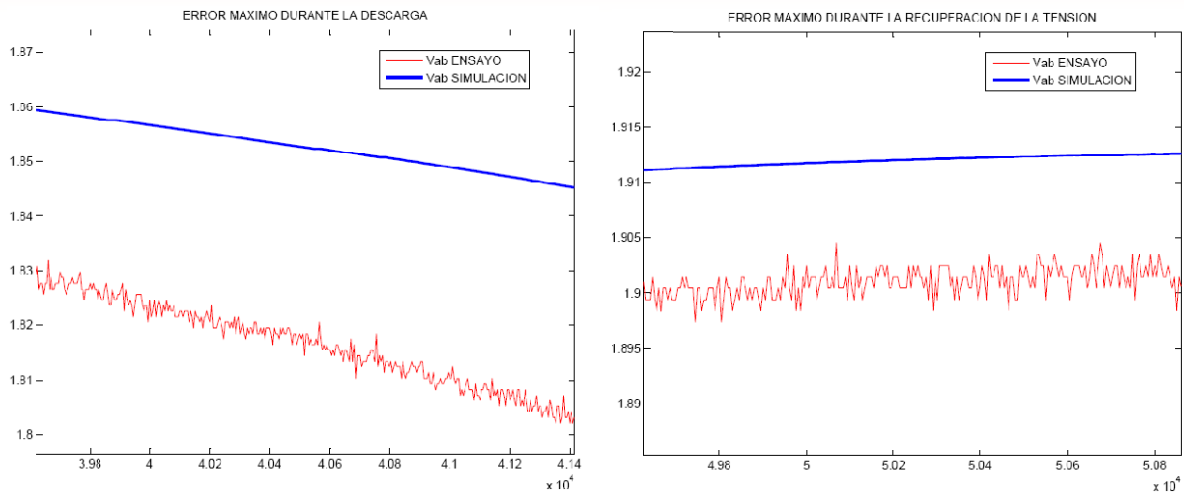
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Podemos ver en esta gráfica que al simular una descarga a 10 amperios, la curva obtenida se aproxima bastante a la real.



Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así parece que el error es insignificante, excepto al final de la descarga.

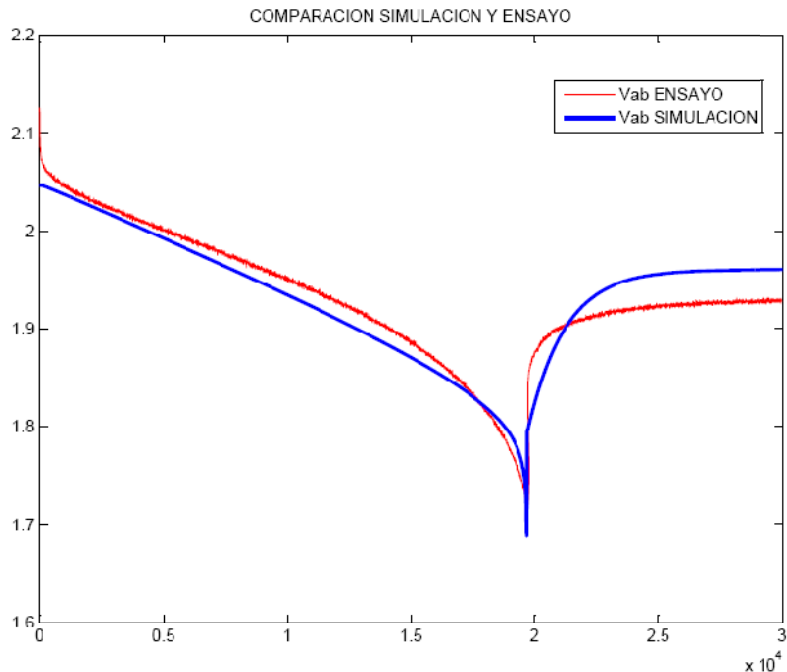


Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 1,5% de la tensión entre bornes nominal, en la recuperación de tensión el error máximo es de 0,75%. Hemos conseguido una regulación bastante buena, observamos que a medida que nos acercamos a la intensidad de descarga nominal el error se hace cada vez más pequeño.

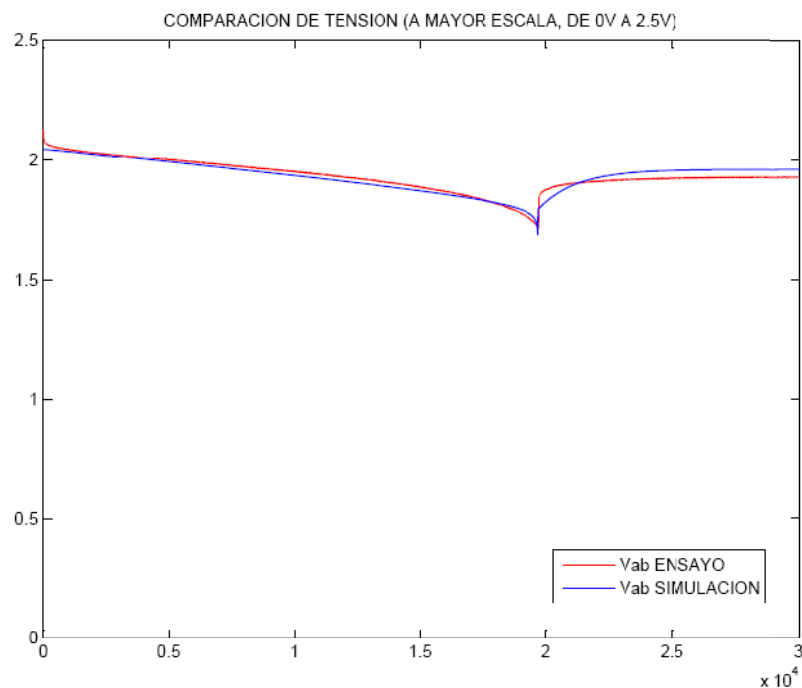


DESCARGA 20 Amp



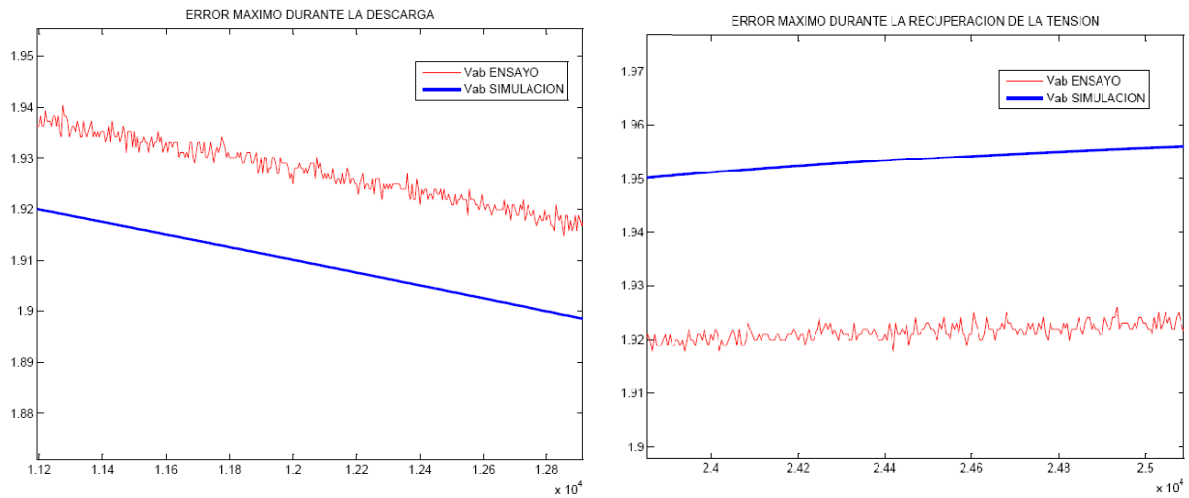
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 20A, se aprecia una buena forma de la curva que se asemeja bastante a la realidad, pero el modelo da como resultado una recuperación de tensión bastante mala comparada con la curva de descarga.



Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de que el error es despreciable.

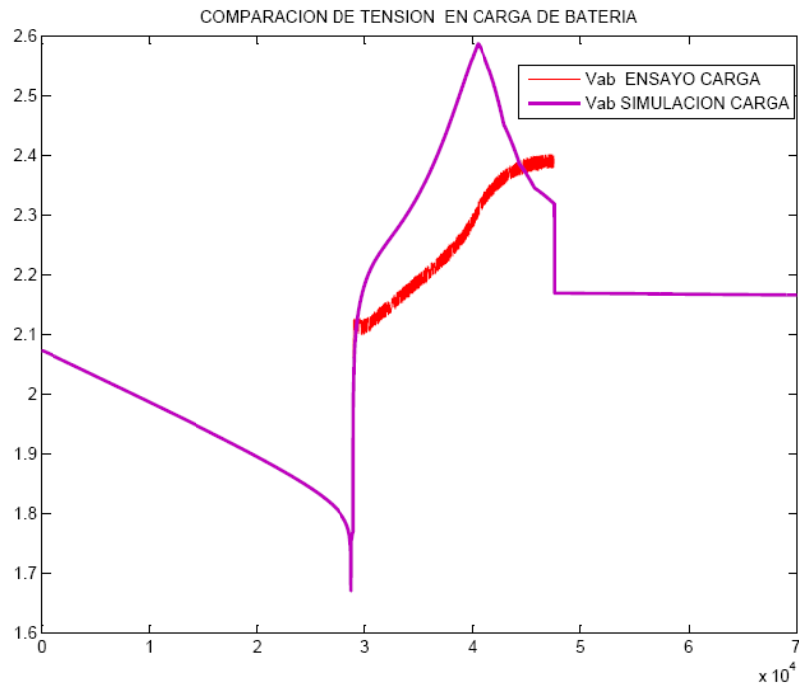


Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 0,9% de la tensión entre bornes nominal, en la recuperación de tensión el error máximo es de 1,5%. Hemos conseguido una regulación bastante buena, observamos que a medida que nos acercamos a la intensidad de descarga nominal el error se hace cada vez más pequeño.

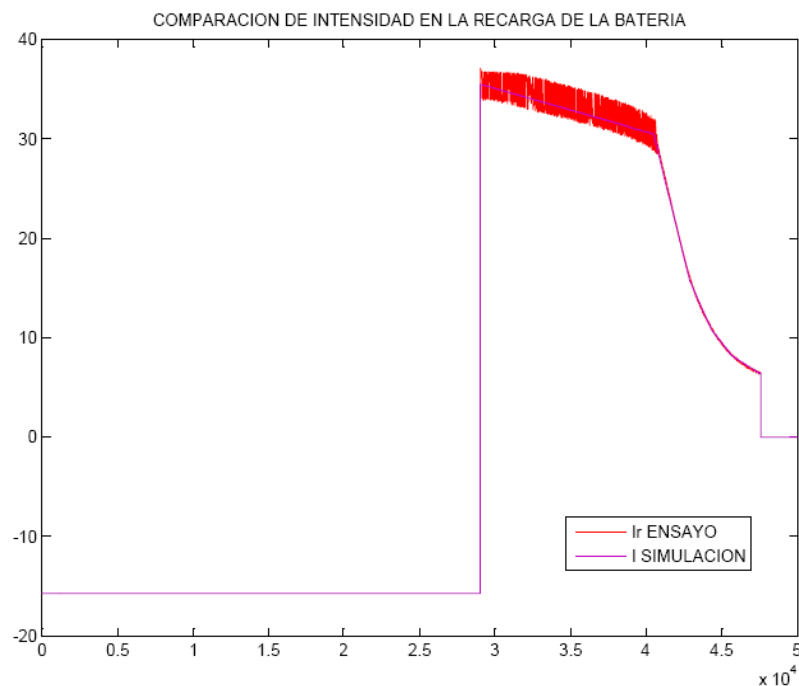


CARGA DE LA BATERIA



Comparación de la tensión en bornes de la batería

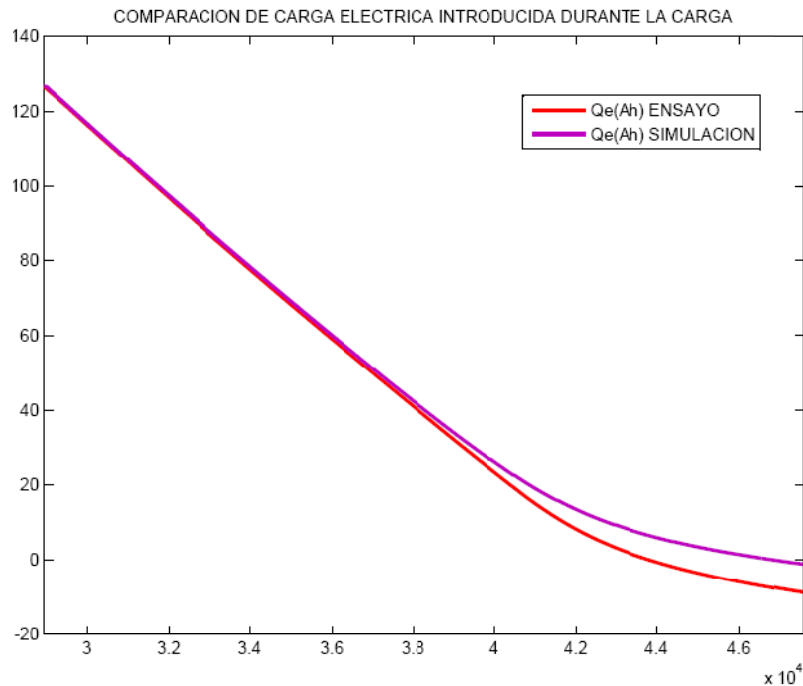
Al simular la carga de la batería no obtenemos los resultados esperados, la tensión se dispara demasiado rápido, alcanzando valores de 2,6v mayores que el máximo recomendado por el fabricante de 2,4v. Se aprecia en la gráfica que el sistema responde de una manera extraña ante el cambio de corriente de carga. Se ha comprobado que el modelo responde correctamente a una carga a intensidad constante en otras pruebas realizadas.



Comparación de intensidad

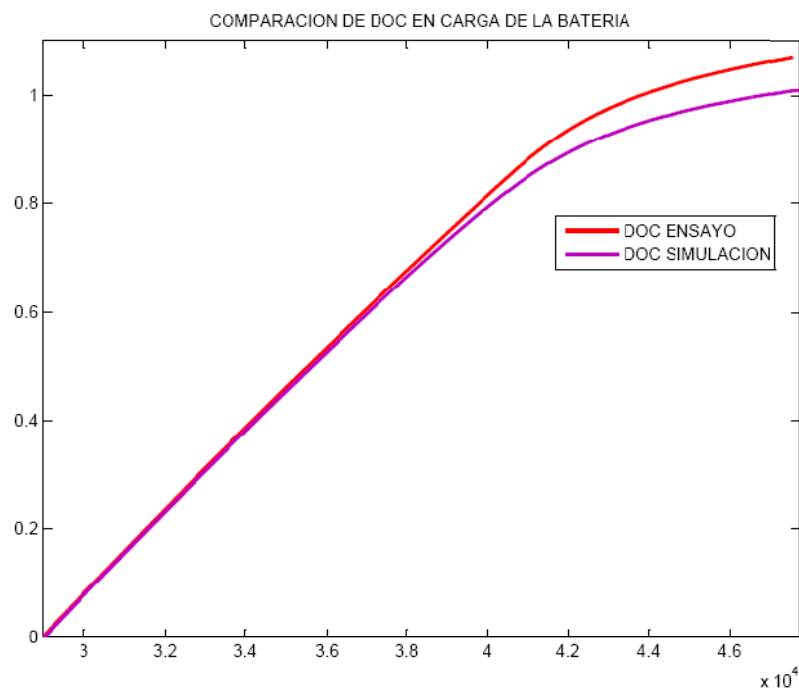


Podemos apreciar que nuestra señal de intensidad creada para la simulación con el bloque “signal builder” se ajusta correctamente a la intensidad registrada durante el ensayo.



Comparación de carga eléctrica extraída - introducida

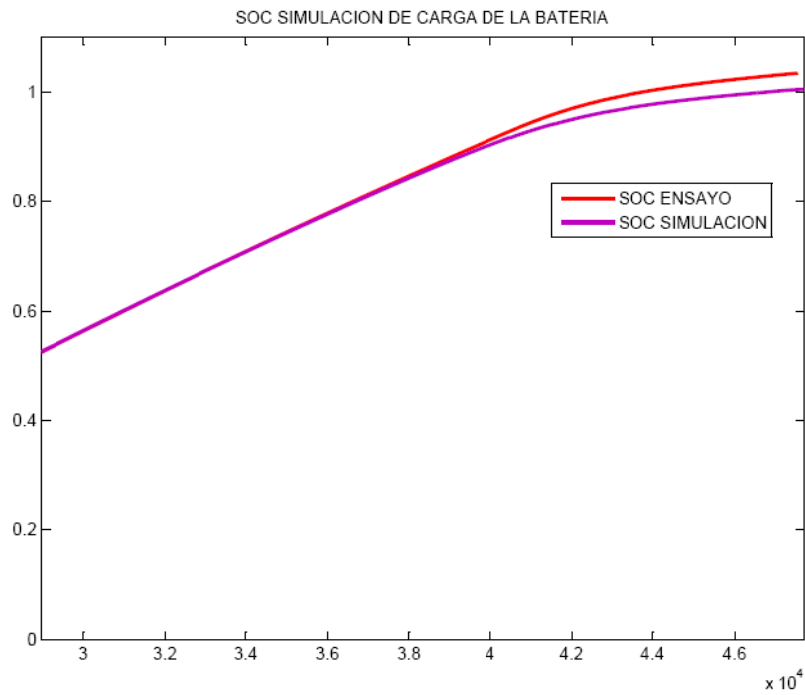
Como vemos al inicio la simulación se ajusta mucho a la realidad, pero al final cuando la intensidad disminuye se aparecían diferencias considerables. El ensayo al final toma valores negativos porque se le ha metido mas carga de la que se le había extraído en la descarga C10.





Comparación de DOC durante la carga

Se aprecia en la representación gráfica que sucede lo mismo que con la variable Q_e , al final de la carga no se ajustan las curvas.



Comparación de SOC durante la carga

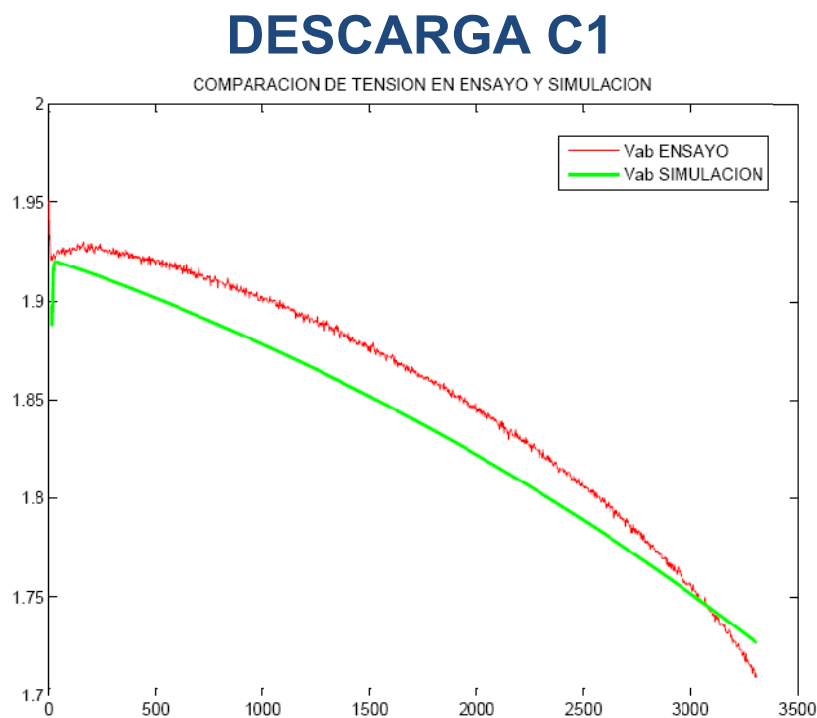
Se aprecia en la representación gráfica que sucede lo mismo que con las variables Q_e y DOC, al final de la carga no se ajustan las curvas.



5.2 Comparación - modelo de 4to orden

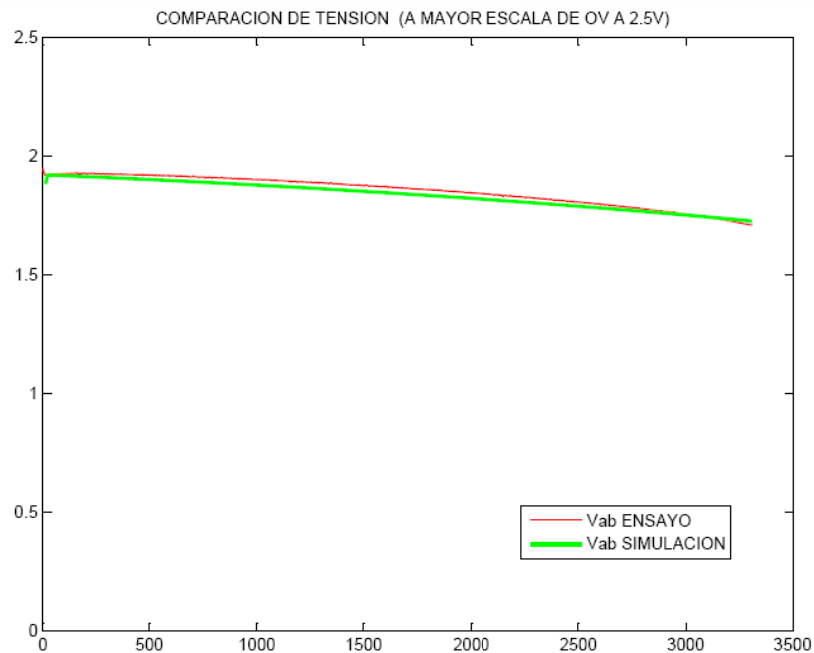
Como indica el título en este apartado procederemos a comparar los resultados obtenidos en las simulaciones de cuarto orden con los ensayos reales. Hay que señalar que el modelo de cuarto orden consigue hacer una buena representación del comportamiento de la batería para márgenes amplios de corriente, cuanto más cerca estemos de la corriente para la que hemos ajustado el modelo el error que cometemos será menor, esto es algo lógico y esperado. Comentaremos más respecto a los porcentajes de error alcanzados en las simulaciones de 4to orden en el apartado 6.2 de conclusiones.

A continuación se pueden ver las comparaciones de las diferentes descargas y de la carga de la batería:



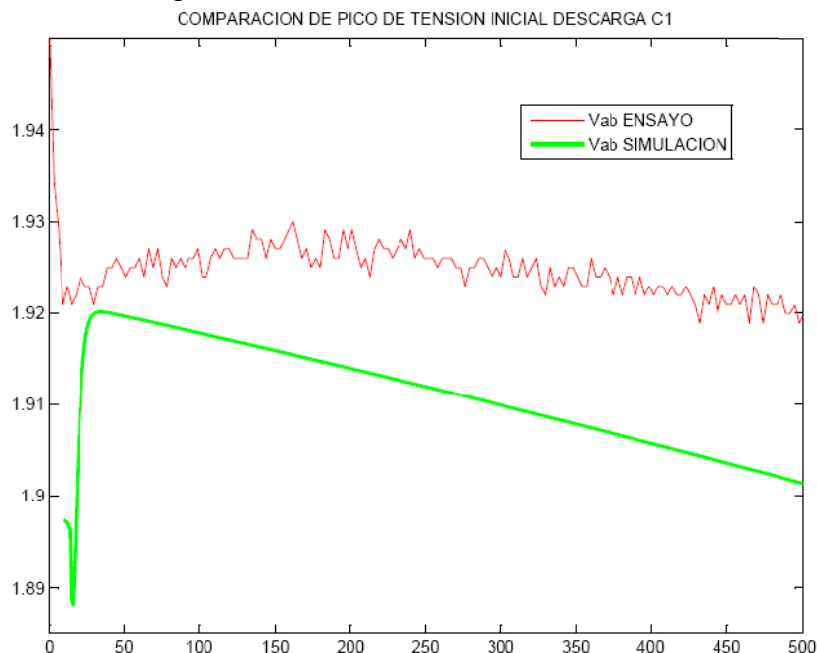
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 86,684. A, más elevada (del orden de 2 veces) que la corriente en la descarga C3 (para la que hemos ajustado el modelo), el error cometido no es elevado teniendo en cuenta la gran diferencia de intensidad. No hay una correcta curvatura.



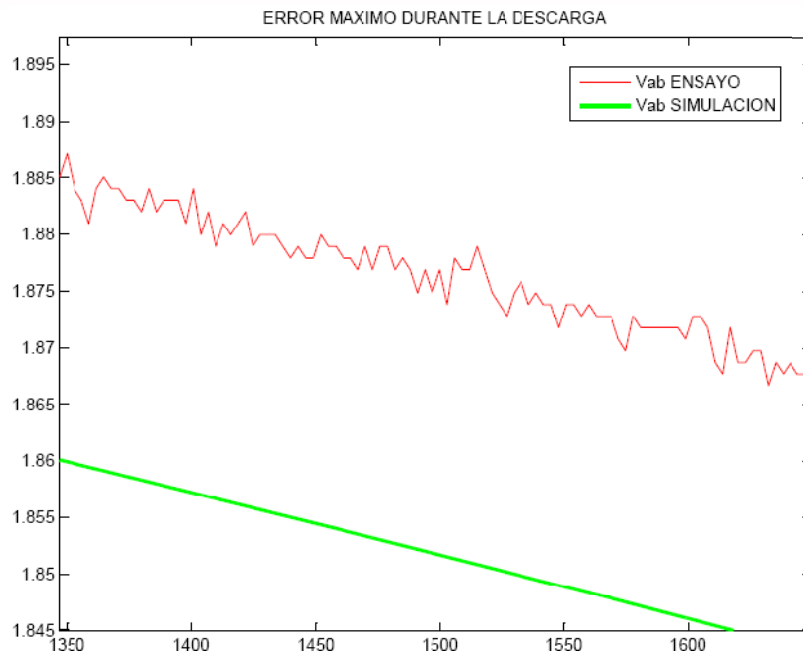
Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de ser tan grande.



Comparación de pico de tensión inicial

Solo comentar que aunque el modelo de cuarto orden representa esta caída de tensión al inicio de la descarga, esta no es representativa de la realidad, ya que produce una caída de tensión muy elevada durante un corto período de tiempo. En cambio en el ensayo realizado, en este caso a la máxima corriente posible, se aprecia que el pico es más prolongado en el tiempo y menos abrupto.



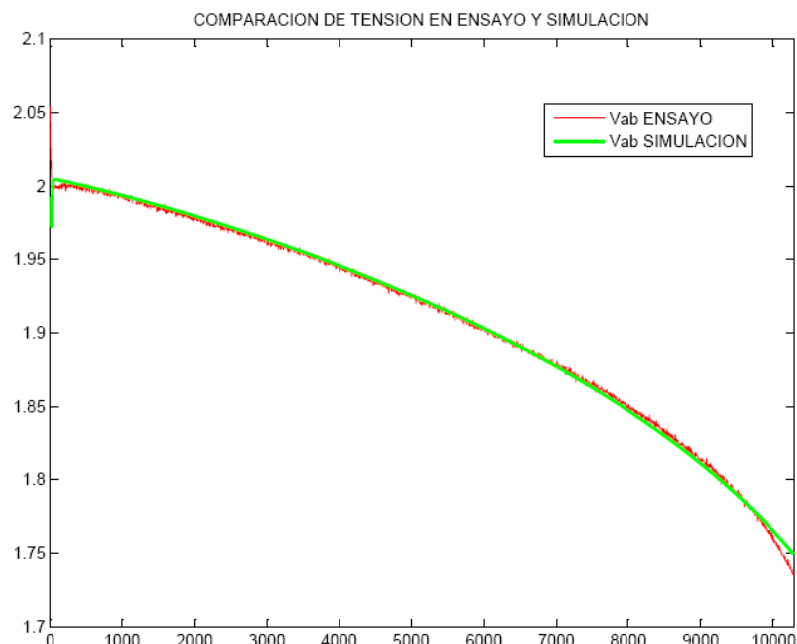
Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 1,25% de la tensión entre bornes nominal, bastante reducido teniendo en cuenta la gran diferencia de corrientes con respecto a la descarga para la que hemos ajustado el modelo.



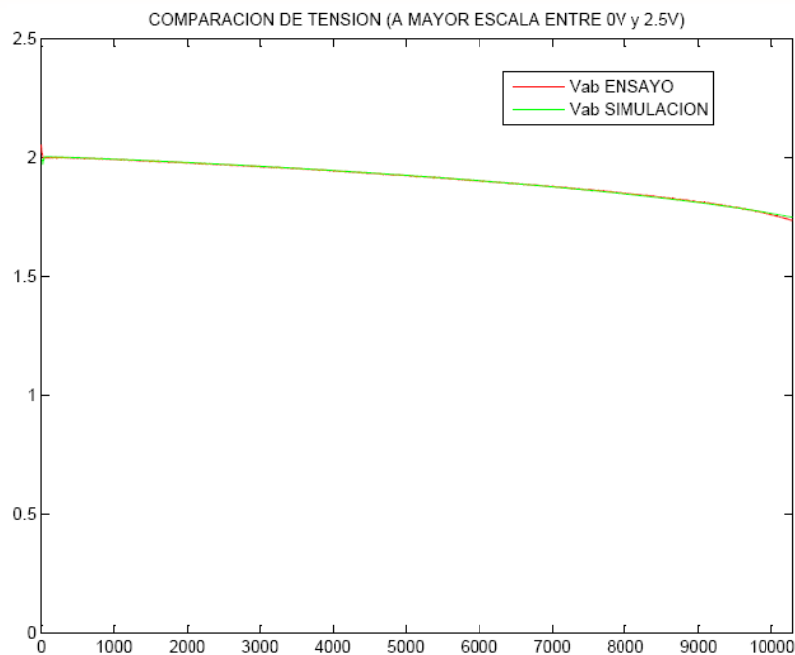
DESCARGA C3

En este caso al tratarse de la intensidad de descarga C3 (para la que hemos ajustado el modelo y por lo tanto el error es menor) de la batería, también se ha hecho una comparación de los demás parámetros representados en el apartado de ensayos y en el de simulaciones, solo se ha hecho en este porque estos parámetros se ajustan con bastante exactitud en todas las descargas y no tiene sentido repetirlo.



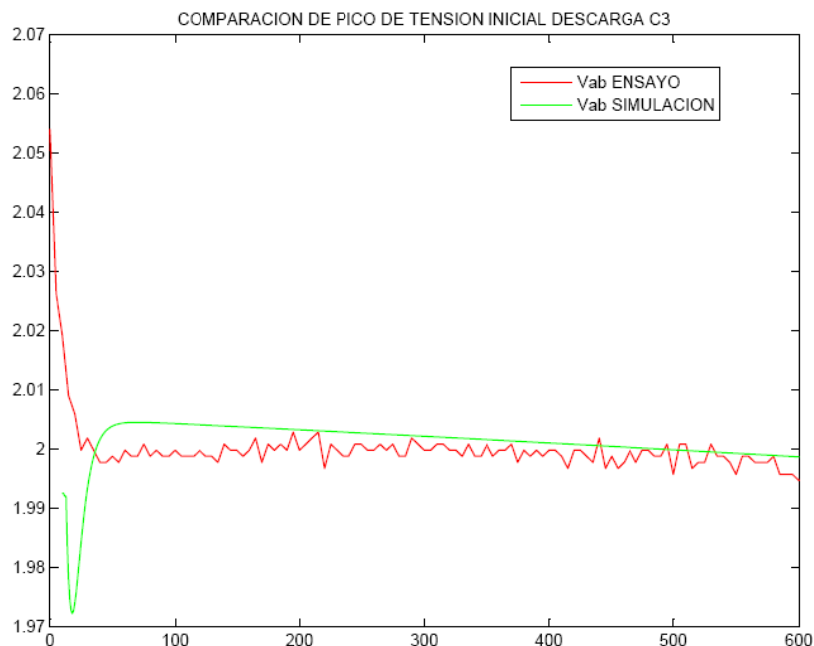
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 39.0316 A, para la que hemos ajustado el modelo, el error cometido es prácticamente nulo. A excepción de los primeros instantes en los que se produce un gran pico de caída de tensión según el modelo de 4to orden, cosa que no es real.



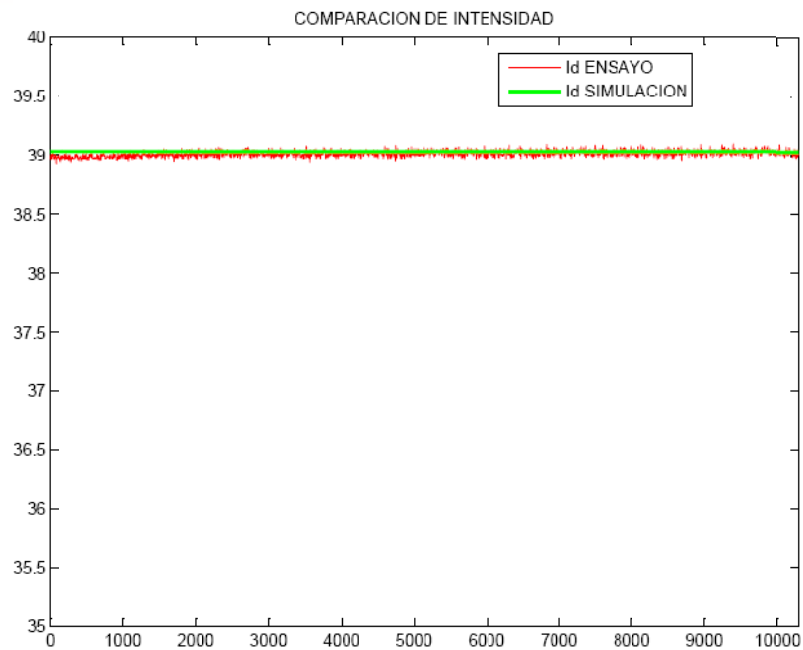
Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así prácticamente no se parecía error alguno en el modelo.



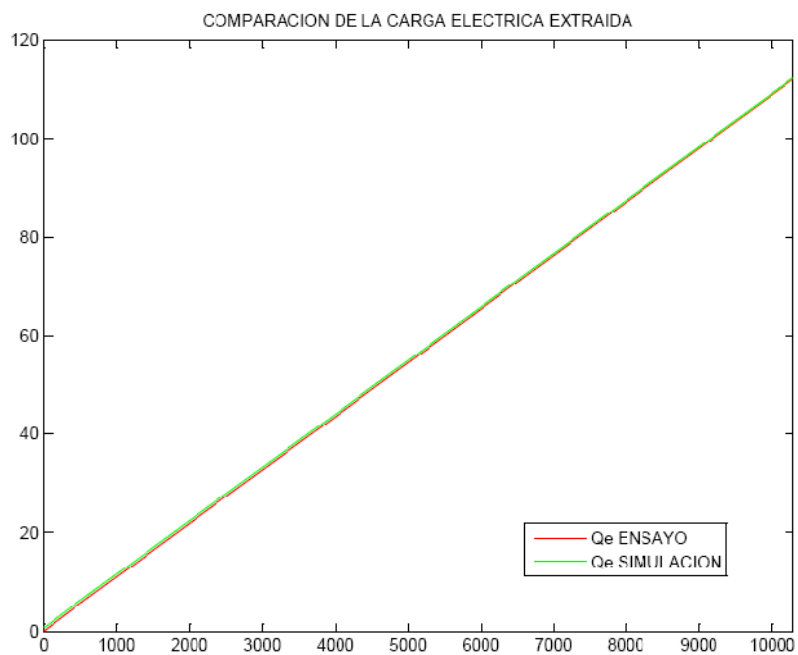
Comparación de pico de tensión inicial

Solo comentar que aunque el modelo de cuarto orden representa esta caída de tensión al inicio de la descarga, esta no es representativa de la realidad, como ya hemos dicho en la descarga C. En el ensayo realizado, se aprecia que no hay pico y luego una recuperación, sino que se produce un periodo de unos 500 segundos en los que la tensión se mantiene prácticamente constante. Es también en esta zona donde el error es mayor, alcanzado un valor del orden de 0,25%



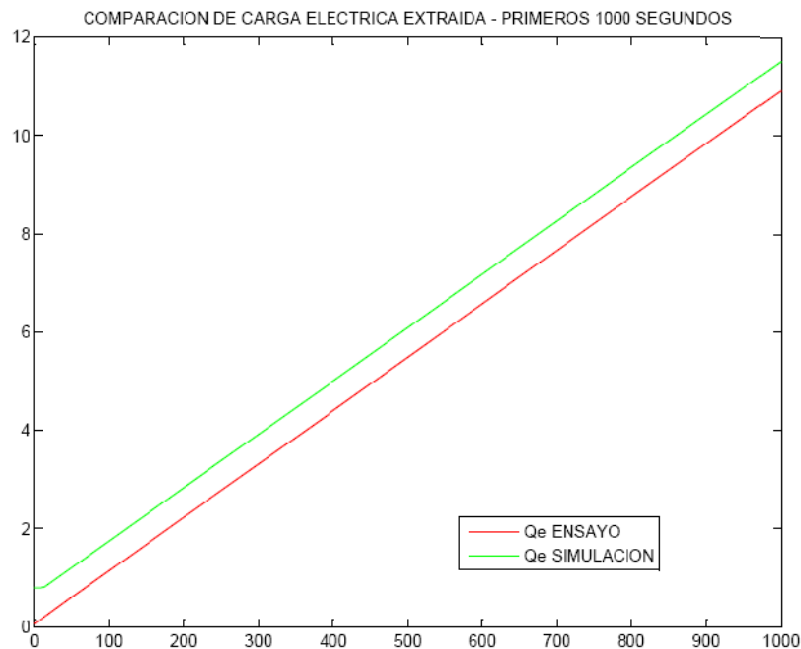
Comparación de la intensidad de descarga

En esta gráfica podemos ver la comparación de la intensidad de descarga, se parecía que al inicio del ensayo (durante los primeros 2000 o 3000 segundos) la intensidad era algo menor, aunque prácticamente no se aprecia.



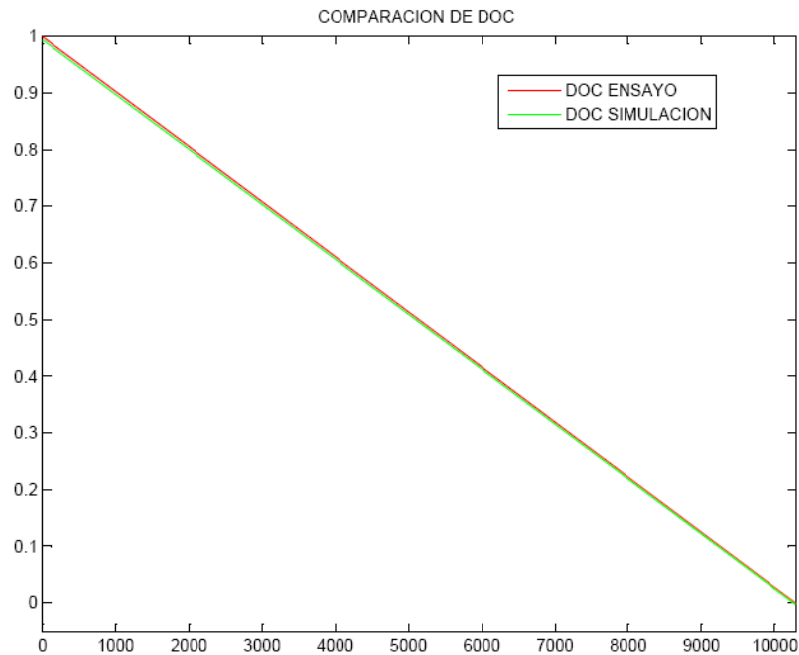
Comparación de pico de la carga eléctrica extraída

Se puede ver en la gráfica anterior que prácticamente no se aprecian diferencias entre ensayo y simulación.



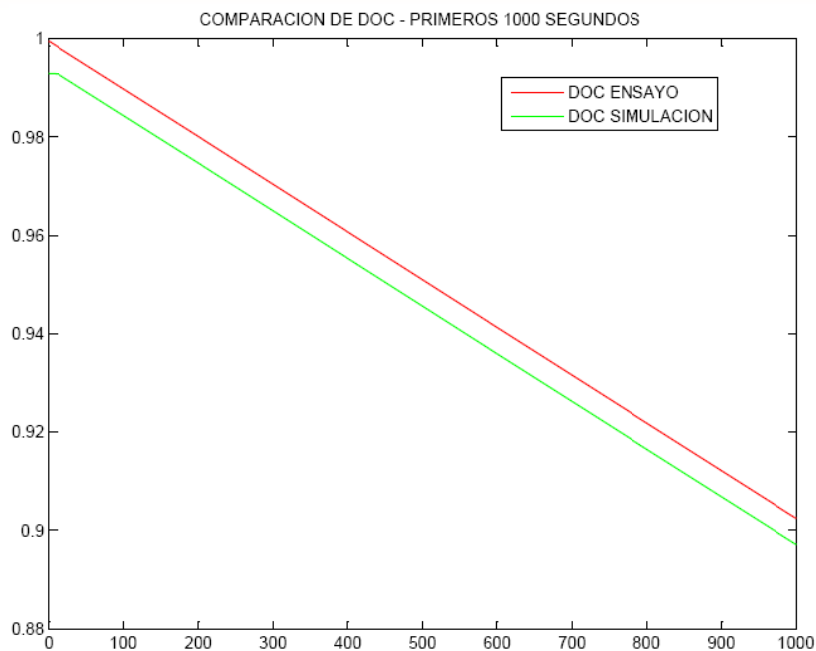
Zoom de los primeros 1000 segundos de Qe

Ahora bien al hacer un Zoom se aprecia que en tiempo 0 seg. La batería en el modelo ya tiene algo de carga extraída, esto lo indicábamos en el fichero **ensayo.m** con la condición $Q_0=0,005 \cdot C_n$. Es por esto que se aprecia esta pequeña diferencia.



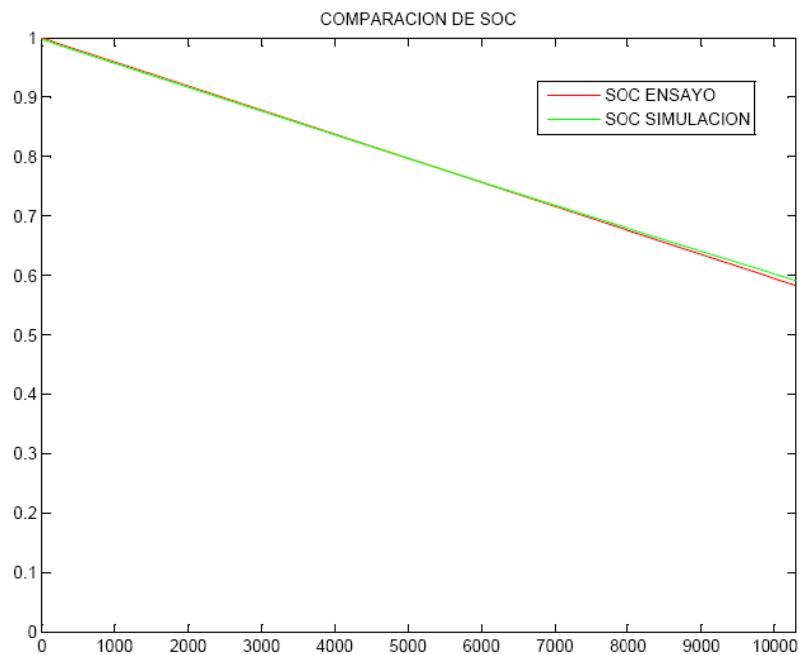
Comparación de el parámetro DOC

Se puede ver en la gráfica anterior que prácticamente no se aprecian diferencias entre ensayo y simulación.



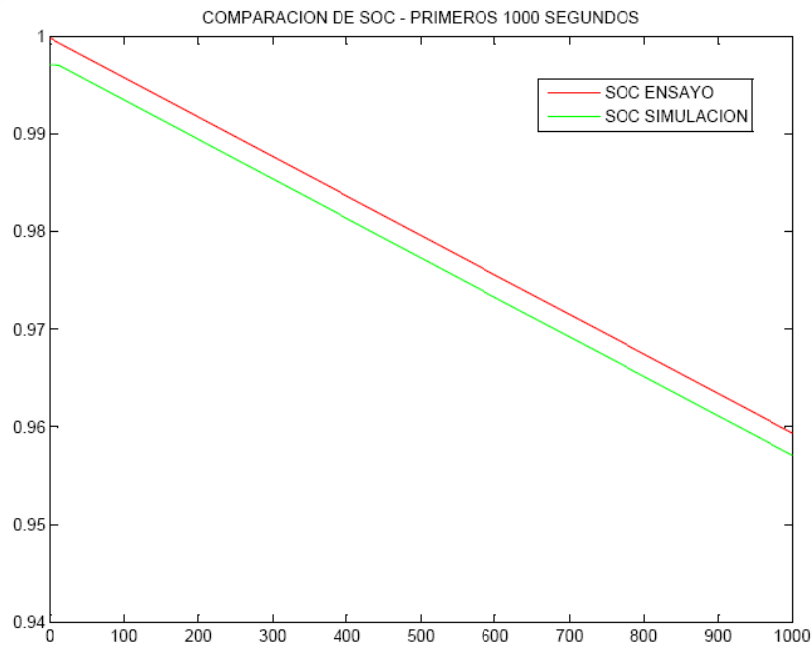
Zoom de los primeros 1000 segundos de DOC

Ahora bien al hacer un Zoom se aprecia que en tiempo 0 seg. La batería en el modelo no está al 100%, esto lo indicábamos en el fichero **ensayo.m** con la condición $Q_0=0,005 \cdot C_n$. Es por esto que se aprecia esta pequeña diferencia.



Comparación de el parámetro SOC

Se puede ver en la gráfica anterior que prácticamente no se aprecian diferencias entre ensayo y simulación.

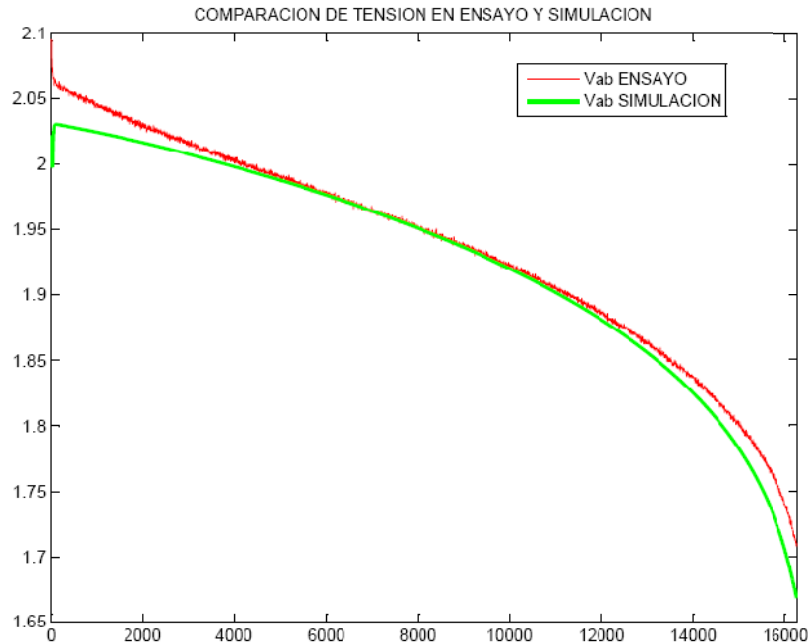


Zoom de los primeros 1000 segundos de SOC

Ahora bien al hacer un Zoom se aprecia que en tiempo 0 seg. La batería en el modelo no está al 100%, esto lo indicábamos en el fichero **ensayo.m** con la condición $Q_0=0,005 \cdot C_n$. Es por esto que se aprecia esta pequeña diferencia.

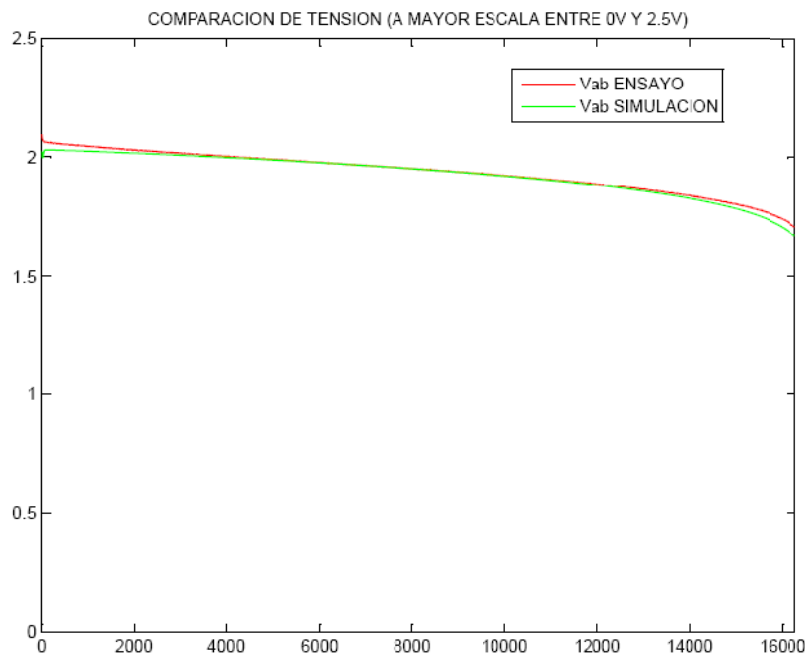


DESCARGA C5



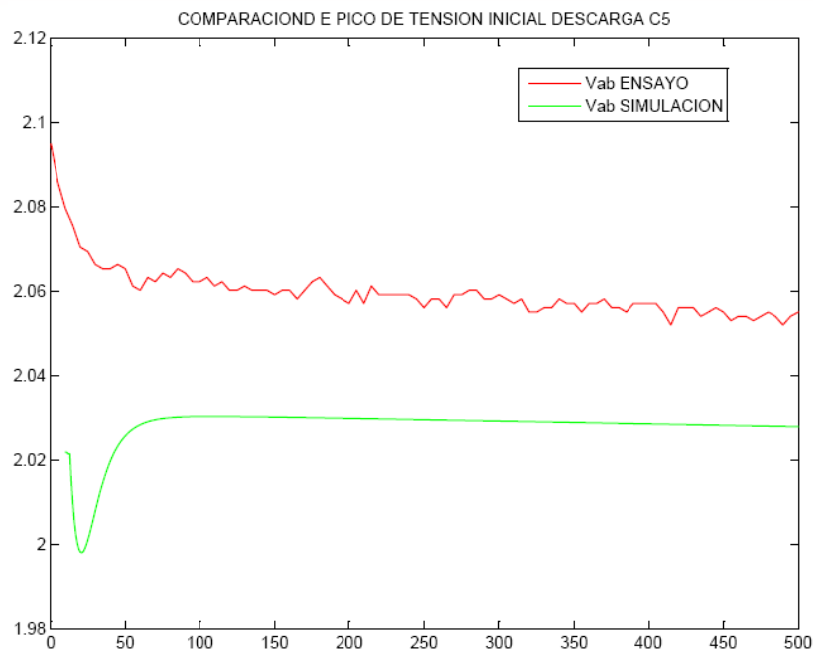
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 27,0868 A, es decir a unos 12 amperios por debajo de la intensidad para la que hemos ajustado el modelo el error cometido no es muy elevado. No hay una correcta curvatura al inicio de la descarga.



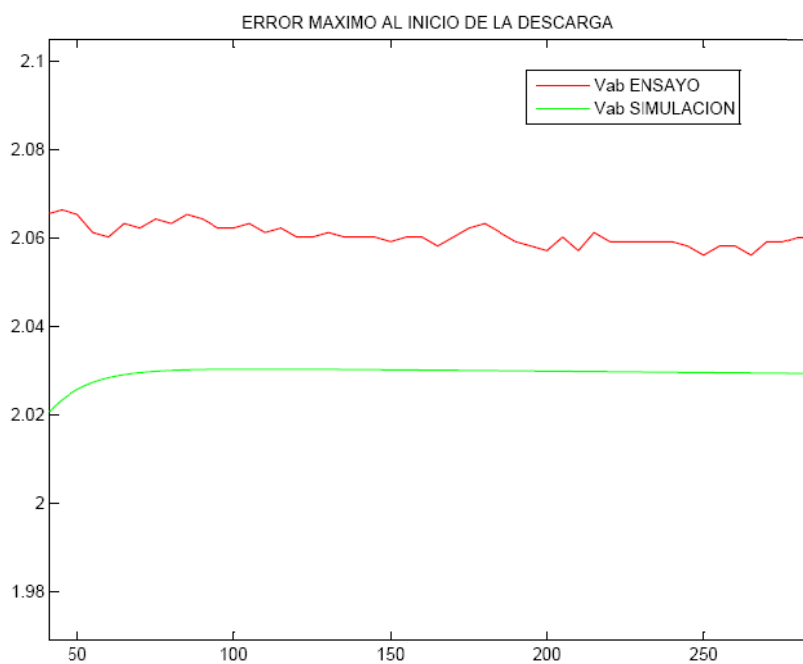
Comparación a mayor escala

Podemos apreciar la curva de tensión durante la descarga a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de que el error no es tan grande. Solo se ve con claridad al inicio y al final de la descarga.



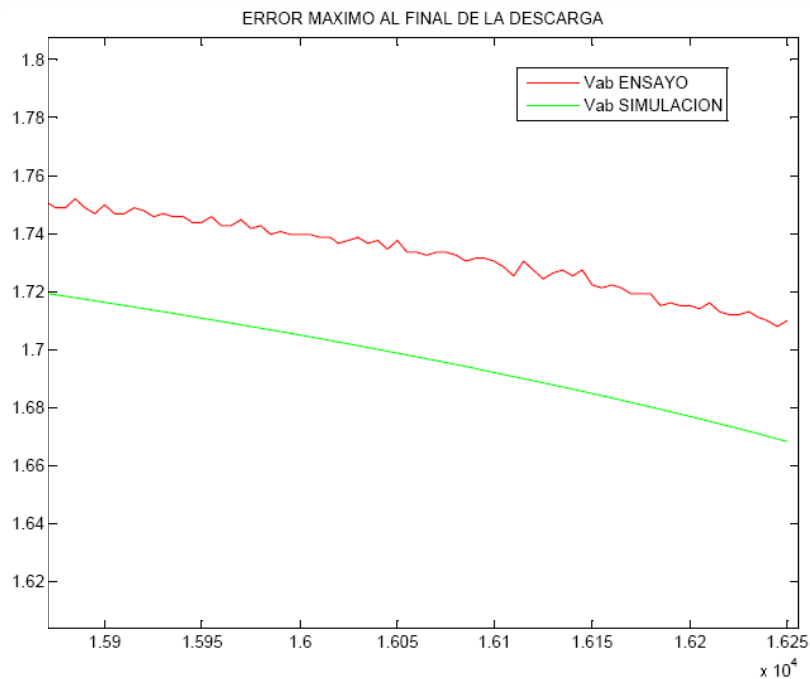
Comparación de pico de tensión inicial

Aquí podemos decir lo mismo que hemos dicho para las descargas C1 y C3.



Zoom al inicio de la descarga donde se aprecia un error

En concreto el error máximo que se produce al inicio de la descarga es de un 2% de la tensión entre bornes nominal, bastante reducido si tenemos en cuenta que el modelo está funcionando para un margen amplio de intensidades de descarga.

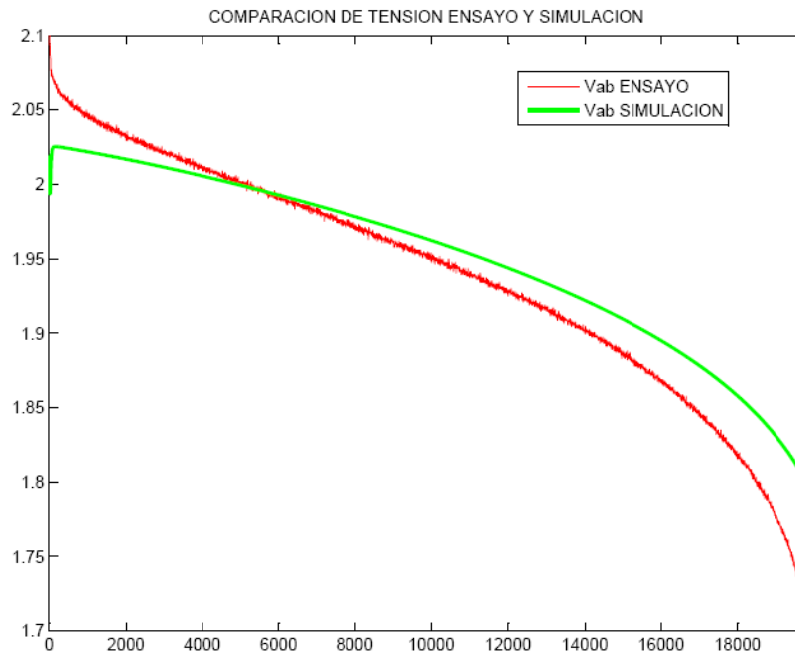


Zoom al final de la descarga donde se aprecia un error

En concreto el error máximo que se produce al final de la descarga es de un 2% de la tensión entre bornes nominal, bastante reducido si tenemos en cuenta que el modelo está funcionando para un margen amplio de intensidades de descarga.

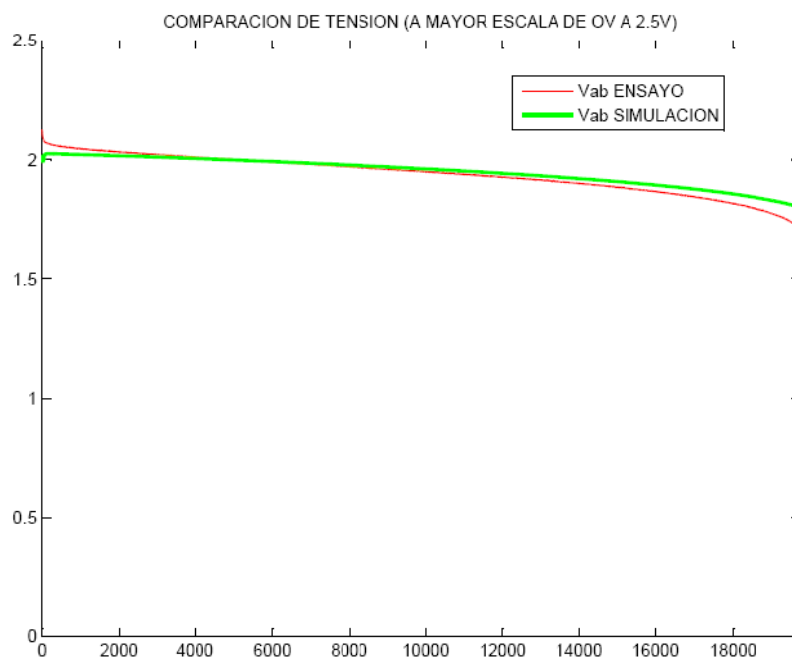


DESCARGA 20 A



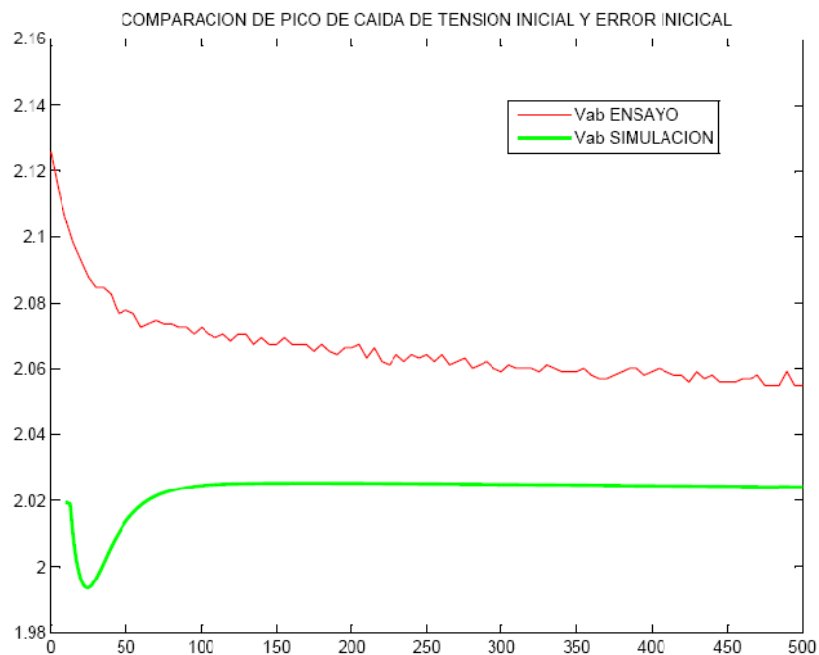
Comparación de la tensión en bornes de la batería

Observamos en esta gráfica que al simular una descarga a 20 A, de aproximadamente la mitad de la corriente en la descarga C3 (para la que hemos ajustado el modelo), el error cometido es bastante considerable, se puede ver que al inicio no hay pico de caída de tensión, porque esta intensidad es relativamente baja para este tipo de batería, aunque el modelo sí que nos da un pico que no es real.



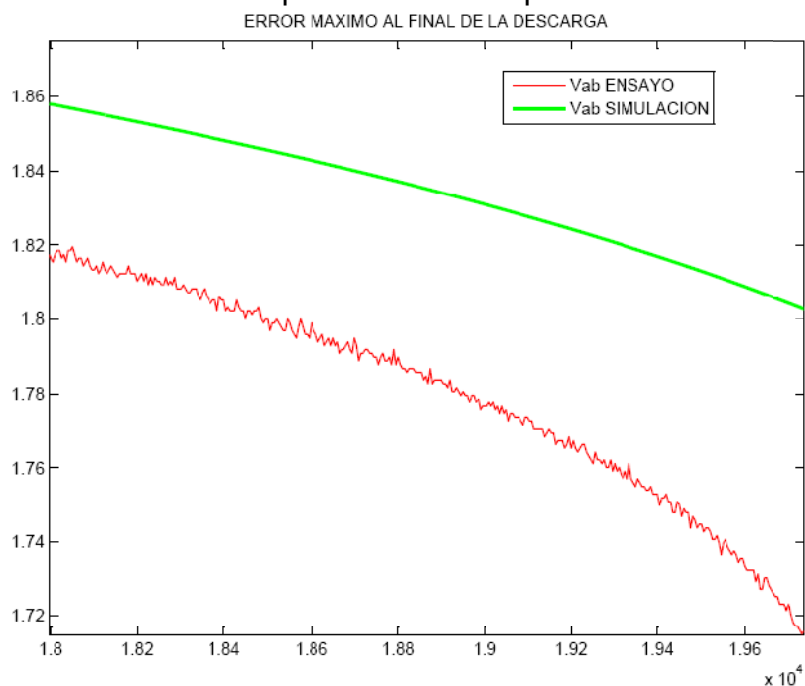
Comparación a mayor escala

Podemos apreciar el error a una escala entre 0 v y 2,5 v, al verlo así no nos da sensación de ser tan grande.



Comparación de pico de tensión inicial

Se puede decir lo mismo que hemos dicho para las otras descargas.



Zoom en donde el error es mayor

En concreto el error máximo que se produce durante la descarga es de un 4% de la tensión entre bornes nominal, bastante elevado para nuestro propósito. Aunque hay que decir que se produce solo durante los últimos 1000 segundos de la descarga, porque si vemos las diferencias unos 1000 seg antes de que termine la simulación el error es de aproximadamente un 2%.



6 CONCLUSIONES

Como cabe esperar al final de una investigación o estudio de cualquier tipo siempre hay que sacar conclusiones de él, pues bien ahora vamos a proceder a presentar las conclusiones obtenidas en este PFC.

Para esto construimos cuatro apartados, en el primero de ellos presentaremos las conclusiones obtenidas del modelo de 3^{er} orden (apartado 6.1), en otro (apartado 6.2) hablaremos de las conclusiones que hemos obtenido del modelo de 4^{to} orden, añadiremos un tercer apartado (6.3) en que hablaremos de posibles aplicaciones prácticas de los modelos estudiados en este PFC y por último estableceremos unas conclusiones finales en el apartado (6.4).

6.1 Conclusiones relativas al modelo de 3er orden

Aquí explicaremos las conclusiones a las que se ha llegado con el modelo de 3^{er} orden. Primero que nada hay que aclarar que los modelos son aproximaciones de la realidad, por lo tanto siempre se comete un error, este puede ser mayor o menor, pero al fin y al cabo siempre hay un error.

Aclarado esto, se puede afirmar que el modelo se ha ajustado lo máximo posible para la descarga C10 por ser la intensidad nominal, se aprecia en el apartado 5.1 de este PFC que a medida que nos acercamos a la intensidad nominal (para la que hemos ajustado el modelo) el error entre la simulación y el ensayo real se hace cada vez más pequeño. También notamos que en descargas a intensidad mayor a la nominal el modelo hace que la tensión este por debajo de la real, y en descarga a intensidad menor que la nominal el modelo hace la tensión este por encima de la real.

Es por esto que consideramos dos posibles intervalos para validar el modelo:

- Un **primer intervalo** estrecho de intensidad, de valor **10 A < Id < 20 A**.

Es decir se trata de las descargas de 10 A, 15,8 A (C10) y 20 A respectivamente. En este intervalo el **error** cometido varía entre **0,75% y 1,5%**, bastante reducido. Aquí el modelo se ajusta con suficiente precisión en las descargas.

- Un **segundo intervalo** amplio de intensidad, de entre **2,18 A < Id < 39 A**.

Es decir se trata de las descargas C100 (2,18 A); 10 A; C10 (15,8 A); 20 A; C3 (27 A) y C5 (39 A) respectivamente.

En este intervalo el **error** cometido es menor del **5%**, bastante elevado.



Este intervalo lo podemos utilizar en aquellos casos en los que no nos haga falta una precisión elevada, pero si tener disponibilidad de poder simular descargas a regímenes dispares.

- Hay que aclarar que en caso de que estuviésemos interesados en simular descargas de esta batería entorno a $I_d=40$ A por ejemplo, lo que debemos hacer es ajustar los parámetros del modelo en el archivo de MATLAB.m hasta obtener una curva que se ajuste lo máximo posible a la descarga de 40 A, una vez conseguido esto podremos simular descargas entre 35 y 45 A con suficiente precisión.
- Como conclusión final podemos decir que este modelo es de fácil comprensión y uso, además se obtienen buenos resultados si el abanico de descargas no es muy amplio, por el contrario no simula correctamente la carga de la batería a intensidad variable, por lo que no es válido para simular este tipo de carga.

Los parámetros utilizados para validar el modelo son los siguientes:

```
%*****MODELO DE TERCER ORDEN*****  
  
%-----Declaración de variables y constantes-----  
  
%descarga  
titaA=26;Rtita=0.2;Ctita=15;tau1=1500;  
C0=122.7063;titaF=-40;epsilon=0.48;Kc=1.7;  
R00=0.0062;A0=-0.3;R10=0.001;Ke=1.7E-3;  
Em0=2.17;C0asterisco=122.7063;Iasterisco=15;delta=0.226;  
CItita=126.7222;  
  
%recarga  
Ep=1.95;A21=-8;A22=-8.45;R20=0.02;  
Gp0=2E-12;Vp0=0.1;Ap=2;  
run MODELO_FINAL;  
%-----  
%Estos valores de los parámetros son los que se han usado en todas las  
%simulaciones.
```



6.2 Conclusiones relativas al modelo de 4to orden

Aquí explicaremos las conclusiones a las que se ha llegado con el modelo de 4^{to} orden. Primero que nada hay que aclarar que los modelos son aproximaciones de la realidad como hemos dicho en el punto 6.1, por lo tanto siempre se comete un error, este puede ser mayor o menor, pero al fin y al cabo siempre hay un error.

Aclarado esto, se puede afirmar que el modelo se ha ajustado lo máximo posible para la descarga C3, se aprecia en el apartado 5.2 de este PFC que a medida que nos acercamos a la intensidad de descarga C3 (para la que hemos ajustado el modelo) el error entre la simulación y el ensayo real se hace cada vez más pequeño. También notamos que en descargas a intensidades mayores (C1) el modelo hace que la tensión este por debajo de la real, y en descarga a intensidades menores (C5 y 20 A) el modelo hace la tensión este por encima de la real.

- Así pues podemos dar por validado el modelo de 4^{to} orden para un **margen amplio** de corrientes de descargas, de valor **20 A < Id < 87 A**.

Es decir se trata de las descargas de 20 A, 27,0868 A (C5), 39,0316 A (C3) y 86,684 A (C1) respectivamente.

En este intervalo el **error** cometido varía entre **0,25% y 2%**, siendo muy reducido si tenemos en cuenta que estamos validando el modelo para un intervalo de corrientes de casi 67 A, esto si despreciamos el pico de caída de tensión inicial en todas las descargas y el aumento brusco que se produce en los últimos 1000 segundos de la descarga a 20 A, en donde el error alcanza un 4%.

- Como conclusión final podemos decir que este modelo es de fácil comprensión y uso. Aunque algo más complejo de ajustar e implementar que el de tercer orden, en cambio se obtienen mejores resultados para descargas muy dispares unas de otras. Como no hemos podido hacer funcionar la rama parásita del modelo por falta de tiempo no podemos comentar cuales son los resultados obtenidos para la carga de la batería.

Los parámetros utilizados para validar el modelo son los siguientes:



```
%-----DECLARACION DE PARAMETROS DEL MODELO DE 4to ORDEN-----
%
%
%-----PARAMETROS NOMINALES DE LA BATERIA-----
%
Cn=158;In=15.8;titaN=26;
%
%-----CARGA INICIAL DE LA BATERIA-----
%
Q0=0.005*Cn;
%
%-----DECLARACION DE CONDICIONES-----
%
%Iasterisco = intensidad representativa de la descarga.
Iasterisco=In;
%Citita= capacidad de la batería a una determinada intensidad y temperatura
Citita=126.7222;
%
%-----PARAMETROS DE LA BATERIA-----
%
C0=122.70;Kc=1.7;Delta=0.4;epsilon=0.5;titaF=-40;Ep0=2.09;Ke=0.0004;
Rp0=0.002;Beta=-0.003;Rc=0.003;Rd0=0.05;Ad1=0.001;Ad2=-15;Ad3=-8.45;
TAUd=100;TAUw=5400;Gs0=4E-13;Asv=9.95;Astita=0.07;TAUtita=14400;R=1.2;
Es=1.95;
Id=-15.7365;
%
%-----ABRIR EL MODELO-----
%
open MODELO_FINAL_4to;
```



6.3 Posibles aplicaciones prácticas de los modelos

En el campo de la ingeniería eléctrica la batería de plomo-ácido siempre ha sido un elemento muy utilizado. Hoy en día existen muchas aplicaciones de estas, sobre todo como fuente de energía en aquellos sitios donde no llega la red eléctrica, o como sistema de seguridad en aquellas instalaciones donde no se puede quedar sin suministro de energía como pueden ser centrales y subestaciones eléctricas, centrales nucleares, etc.

Disponer de un modelo de la batería es algo sumamente útil, ya que permite al ingeniero hacer cálculos y suposiciones de qué tipo de batería y cuantas hay que colocar en una determinada aplicación, y además poder simular como se comportara la instalación a diferentes regímenes de funcionamiento antes de realizar la inversión económica.

Por ejemplo estos modelos han sido utilizados por personal de investigación de la Universidad Politécnica de Cartagena para la simulación del comportamiento de las baterías en Submarinos.

Otra posible aplicación que podría utilizarse en parte estos modelos es la de diseñar un sistema que administre la energía en una antena de telecomunicaciones remota (instalada en la montaña). Estas estaciones funcionan con 3 tipos de energías renovables, solar, eólica y térmica (grupo electrógeno. Tienen dos bancos de baterías, de manera que mientras uno se carga el otro está suministrando energía a la instalación. A través de un PLC registrando la tensión y la intensidad y temperatura podemos saber que carga eléctrica se le ha extraído a la batería en cada instante y cuál es su valor de DOC y SOC, sabiendo así que acción debe tomar el sistema en función del valor de estos parámetros. Esta idea ha sido propuesta por José López Andreu ingeniero técnico industrial de EMURTEL S.A. Según él en este tipo de instalaciones no saben cómo medir el nivel de carga de las baterías, realizando cargas incorrectas o descargas por debajo de la tensión final de descarga, que llevan a estropear las baterías a corto plazo, y afirma que sería interesante poder diseñar un sistema de este tipo que según haya sol viento o ausencia de estos utiliza una forma de energía u otra siempre teniendo como última opción el grupo electrógeno.

Esta idea queda propuesta como un posible Proyecto a desarrollar en el futuro.



6.4 Conclusiones finales

A modo de resumen general de este proyecto fin de carrera se establece el siguiente apartado, en el cual detallaremos que modelo es aconsejable utilizar según el caso que estemos tratando.

Primero que nada hemos comprobado que el modelo de cuarto orden es más preciso y se comete menos error para intervalos amplios de corriente de descarga, por lo que aconsejamos utilizar este modelo cuando queramos una buena precisión para simular corrientes muy dispares. En nuestro caso en concreto al simular descargas de entre 20 A y 87 A se produce un error máximo de un 2%. Aunque éste modelo representa la caída de tensión inicial, en realidad en nuestra batería, diseñada para instalaciones de energía renovable, no se aprecia esa caída de tensión. Probablemente, en otro tipo de baterías como las de automóviles o de cualquier otro tipo, si se pueda ver este fenómeno. Aunque este pico inicial carece de importancia.

En cambio cuando estemos interesados en simular descargas muy concretas con pocas variaciones de corriente aconsejamos usar el modelo de tercer orden, debido a su sencillez de ajuste e implementación, que consigue muy buenos resultados siempre y cuando no variemos demasiado la corriente de descarga, ya que si lo utilizamos para descargas a intensidades muy diferentes el error aumenta rápidamente. En nuestro caso para un intervalo de 10 A el error es menor de un 1.5%, pero para un intervalo de intensidades de 38 A aproximadamente el error es de un 5%, claramente superior al cometido con el de cuarto orden.

De esta manera hemos validado los modelos propuestos en los artículos, alcanzando los objetivos de este PFC. Hubiese sido interesante disponer de más tiempo para investigar que sucede con la rama parásita del modelo de cuarto orden y así poder simular la carga de la batería, aunque si lo hemos hecho con el de tercer orden que no nos dio buenos resultados, porque la intensidad de carga no era constante.



7 BIBLIOGRAFIA

La bibliografía básica, referente al presente proyecto, la podemos encontrar en el laboratorio de I+D del Departamento de Ingeniería Eléctrica, en la página web de AGILENT y en la biblioteca de la Universidad Politécnica de Cartagena.

- Agilent AN 372-2 Battery Testing (Application Note).
- USER'S GUIDE Agilent Technologies DC electronic loads.
- Computer Boards: "CIO-DAS 1602/16".(adquisición de datos)
- Manual del Usuario del cargador (Victron energy).
- Instrucciones de Uso, baterías de plomo TAB (ver Anexo IV).
- Manual de ayuda de Matlab.
- Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería.
- Simulink dynamic system simulation software User's guide
- Manuales varios de Matlab descargados de internet.
- Artículos de modelización de baterías (ver ANEXOS I, II y III).



8 ANEXOS

8.1 ANEXO I – Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery

8.2 Anexo II – New Dynamical models of lead-acid batteries

8.3 Anexo III – Dynamical models of lead-acid batteries. implementation issues

8.4 Anexo IV – Instrucciones de uso y características de la batería

Anexo I



Charge and Discharge Fourth Order Dynamic Model of the Lead Acid Battery

Giglioli, R.
Pisa University
Italy

Buonarota, A., Menga, P.
ENEL - D.S.R.
Italy

Ceraolo, M.
C.R.I.T.A.
Italy

Abstract

The presented lead-acid battery model comes from an electrical analogy of electrochemical reactions that associates a branch of an electrical network to each reaction.

The mathematical model of the battery, in turn, comes from the equations of this network taking into account the charge and the thermal balance during charge and discharge processes.

The model is described by a simple fourth order system of differential equations and by a system of algebraic equations.

An identification method of model parameters is suggested.

An example of the utilization of the model for the simulation of the behaviour of the batteries of an electrical vehicle during a standard urban cycle is presented; the results of the simulations performed and their accordance with laboratory tests are shown.

1. Introduction

It's easy to understand the importance of having suitable mathematic models for the components of an electrical system to ease its design and management; for the electrical batteries in particular, a good model is also the base to develop a precise state-of-charge observer, that is needed for optimal management of the battery.

For these reasons a general model, capable of describing the electrical response both during charge and discharge, as well as the thermal behaviour of the battery, was studied and presented in [1,2].

This paper presents an evolution of that model, that is believed to be superior because it is simpler and gives results having a better agreement with the experimental data; moreover, also parameters identification is easier.



Algebraic equations

$$V_{AB} - R_p I_p - R_d I_d - R_w I_w - E_p = 0$$

$$I_s - G_s V_{AB} = 0$$

$$I - I_p - I_s = 0$$

$$P_1 - R_p I_p^2 - R_d I_d^2 - R_w I_w^2 - (V_{AB} - E_s) I_s = 0$$

$$\Theta - \Theta_a - \Delta\Theta = 0$$

Differential equations

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{\tau_d} (I_p - I_d)$$

$$\frac{dI_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (I_d - I_w)$$

$$\frac{d\Delta\Theta}{dt} = \frac{1}{\tau_\Theta} (P_1 R - \Delta\Theta)$$

$$\frac{dQ_0}{dt} = -I_p$$

with the initial conditions ($t=0$):

$$\begin{aligned} I_d &= I_{d0}; & I_w &= I_{w0}; \\ Q &= Q_0; & \Delta\Theta &= \Delta\Theta_0 \end{aligned}$$

The parameters of these equations are described in the following section.

3.2 Model parameters

The values of model parameters are non-linear functions of the state variables of the battery.

- Battery capacity

With reference to the nominal values of voltage, current, and discharge time V_n, I_n, T_n of the battery (measured at the nominal temperature Θ_n so that it is $C_n(\Theta_n) = I_n T_n$), the battery capacity C^* at discharge time T_n is a function of temperature and can be expressed as [1,2]:

$$C^*(\Theta) = T_n I^*(\Theta) = C_0 (1 - \Theta / \Theta_f)^\varepsilon \quad (1)$$

where:

- Θ_f = electrolyte freezing temperature;
- C_0 = battery capacity at zero centigrade degrees
- ε = empirical exponent
- I^* = current at discharge time T_n

In discharge regime and at a constant current I and constant temperature Θ the battery capacity, expressed in normalized form, depends only by the current, as was experimentally observed [1,2]; this relationship can be written:

$$\frac{C(I, \Theta)}{C^*(\Theta)} = \frac{K_c}{1 + (K_c - 1) |I / I^*|^\delta} \quad (2)$$

where K_c and δ are empirical coefficients.

Taking into account eq. (1), eq. (2) can be rewritten as:

$$C(I, \Theta) = C_0 \frac{K_c (1 - \Theta / \Theta_f)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) |I / I^*(\Theta)|^\delta} \quad (3)$$

having four interpolation parameters: C_0, K_c, δ and ε .

It must be noted that eq. (3) stays valid also in case of time variable current, substituting the variable I with I_m so defined [1,2]:

2. Qualitative electric analogy of the chemical reactions

Each chemical reaction inside accumulators can be represented with a good degree of approximation by means of an electrical analogy, in the form of a network having an e.m.f. in series with an RC circuit [3].

On this basis, the electrochemical accumulator can be represented, by the electrical network shown in fig. 1 having:

- the branch (p) of the main reversible reactions of charge-discharge;
- the branches (s), each one corresponding to an irreversible parasitic reaction (the irreversibility being represented by the ideal diode)

For the lead-acid battery here considered, the proposed equivalent electrical network consists of two main branches, as shown in fig. 2, wherein the irreversible branch is able to simulate both current losses during the charge process (the most important one being water electrolysis) and self-discharging.

In the primary branch (p) the RC network represents the ohmic, polarization and diffusion phenomena, in order to describe the dynamic response of the accumulator operating under variable conditions.

The dynamic phenomena of the secondary branch (s) are less important, as the amplitude of its current (I_s) becomes a significant fraction of that of the primary branch (I_p) only in the particular conditions of the gassing occurring around the end of recharge ($I_s \geq I_p$), and of self-discharge ($I_s = I_p$)

3. Model description

3.1 Mathematical description

Being the accumulator an electrical bipole, it can be modeled, as a (strongly non-linear) dynamic system having a current as input and a voltage as output.

The state variables of this system can be chosen as follows:

- a) $Q[\text{Ah}]$: electrical charge extracted (that is the needed charge to completely fill the battery);
- b) $\Delta\Theta[^\circ\text{C}] = \Theta - \Theta_a$: temperature interval between electrolyte and ambient;
- c) $I_d[\text{A}]$ and $I_w[\text{A}]$: "charge transfer" and "diffusion" currents respectively.

With reference to these state variables, and the network shown in fig. 2, the model of the battery can be expressed by the following equations and the related block diagram shown in fig. 3.



$$I_m = 0 \quad \text{if } I_w \text{ is positive or zero}$$

$$I_m = (Q - Q_0)/(t - t_0) \quad \text{if } I_w \text{ is negative}$$

where t_0 is the last time in which I_m is become negative, and Q_0 is the value of Q at t_0 .

In addition to the above quantities, the following ones can be defined:

- Depth-of-charge $DOC = 1 - Q/C(I_m, \Theta)$
- State-of-charge $SOC = 1 - Q/K_c C^*(\Theta)$

DOC is an indicator of the storage level with reference to the capacity offered when the average discharge current is I_m and the temperature is Θ .

SOC is an indicator of storage level referred to the maximum capacity of the battery at the temperature Θ .

- e. m. f

By the electrochemical potential law [3], the e.m.f. E_p can be written as:

$$E_p = E_{p0} + K_E(273 + \Theta)\ln(SOC) \quad (4)$$

where:

E_{p0} = e.m.f. of electrochemical couples

K_E = empirical coefficient.

Also the e.m.f. E_s could be expressed in a similar way, but, considering that the secondary branch becomes relevant when the battery is rather full of charge, i.e. when Q approaches zero, a simple expression: $E_s = \text{const}$ can be assumed.

- Battery resistances

For the resistances in the branch "p", experimental data and electrochemical theory [2,3] suggest the following relationship:

$$R_p = R_{p0}(1 - \beta\Theta) - R_c \ln(SOC) \quad (5)$$

$$R_d = R_{d0} \{ A_{d1}/(1 - SOC) + \exp[A_{d2}(1 - SOC)] \} [1 + \exp | A_{d3} I_d / I^* |]^{-1} \quad (6)$$

$$R_w = -R_c \ln [1 - (1 - SOC)/SOC(K_c - 1) | I_w / I^* |^\delta] \quad (7)$$

where: R_{p0} , R_c , R_{d0} , β , A_{d1} , A_{d2} , A_{d3} are experimental coefficients.

On the (s) branch, G_s is a voltage and temperature dependent conductance. It can be expressed as [1,4]:

$$G_s = G_{s0} \exp[A_{sv} V_{AB} + A_{s\Theta} (\Theta - \Theta_f)] / V_{AB} \quad (8)$$

where G_{s0} , A_{sv} , $A_{s\Theta}$ are empirical coefficients.

- Electrical network time constants

With reference to the scheme shown in fig. 2, the quantities $\tau_d = R_d C_d$ and $\tau_w = R_w C_w$ have been assumed in first approximation constant [2], then they behave as time constants of the network. These time constants can be easily measured as indicated beneath.

- Thermal time constant

They are the time constant τ_d and thermal resistance R shown in fig. 3. These quantities can be easily measured as indicated beneath.

3.3 Identification of model parameters

Theoretically, to identify the four parameters of eq. (3), only four experimental tests are needed. These could be the ones related to the four combinations of two currents and two temperatures, with two couples (I,Q) of which related to the nominal discharge time T_n . In practice, since the couples (I, Θ) that correspond to the discharge time T_n are not known in advance, a few iterations must be repeated for each of the four theoretical tests. Therefore, it is convenient to remove the condition $T_n = \text{const}$ and carry the tests corresponding to the combinations of three currents and two temperatures and then determine the values of I^* correspondent to T_n by means of interpolation.

In addition, at the end of the above mentioned discharges and corresponding charges (up to equalization), the voltage responses must be measured until their complete stabilization. By these measures, using a commercial identification package (e.g. the [7]), it is possible to identify with a sufficient precision the parameters of equation 4 to 7 and the time constants

τ_d, τ_w

The parameters of equation (8) are easily determined by the values of current and voltage at the end of each equalization charge.

Remembering that $\tau_\Theta = C_\Theta R$, where C_Θ is the thermal capacitance of the battery, by the measure of electrolyte temperature during its free evolution, from a value greater than the ambient temperature it is possible to obtain τ_Θ , then R .



4. Comparison between simulations and experimental results

To verify the validity of the model proposed, a number of tests have been carried out, in which a comparison is made between experimental and simulations results. The battery used had the following nominal quantities:

$$C_n = 182\text{Ah}, I_n = 34\text{A}, \Theta_n = 30^\circ\text{C}, \text{ then } T_n = 5.35\text{h}$$

The values obtained for the other parameters are:

$$\begin{array}{llll} C_0 = 139\text{Ah} & K_c = 1.9 & \delta = 0.4 & \epsilon = 0.6 \\ p_0 = 2.14\text{V} & K_e = 0.54\text{mV}/^\circ\text{C} & & \\ R_{p0} = 1.1\text{m}\Omega & R_c = 3.5\text{m}\Omega & R_{d0} = 10\text{m}\Omega & \\ A_{d1} = 8.5\text{E-}3 & A_{d2} = -15 & A_{d3} = -8.45 & \\ G_{s0} = 0.4\text{pS} & A_{sv} = 9.95\text{V}^{-1} & A_{s\Theta} = 0.07^\circ\text{C}^{-1} & \\ \tau_d = 100\text{s} & \tau_w = 5400\text{s} & & \\ \tau_\Theta = 1.44\text{e}4\text{s} & R = 1.2^\circ\text{C}/\text{W} & & \end{array}$$

Using these parameters the beneath described simulations have been performed and the results compared with the corresponding laboratory tests

- Constant current discharge

This test consists in a discharge at a constant current having an initial condition of battery full of charge, that corresponds to the condition $Q=0$, and 30°C of ambient temperature. Since in the condition $Q=0$ there are singularities in the model, it can not be exactly imposed; however, it can be well approximated by the condition $Q \approx 0.005 C_n$, that in the case corresponds to 1Ah.

The result of the simulation is compared with experimental data in fig. 4, where the shapes of measured and simulated battery external voltage are shown.

- Constant current charge

This test consists in a charge at a constant current, having $\Theta=30^\circ\text{C}$ of ambient temperature and an initial condition of battery previously discharged by 138Ah that, in the model, corresponds to the condition of $Q=138$.

The result of the simulation is compared with experimental data in fig. 4, where the shapes of measured and simulated battery external voltage and measured and simulated gassing current are shown.

- Charge acceptance at different levels of charge current

This series of charges has the purpose of showing that higher the charge current, lower the charge stored up to "gassing voltage" (2,4V per cell). All the charges are made at 25°C of ambient temperature and begin with an initial condition of a DOC = 10%.

The result of the simulation is compared with experimental data in fig 5, where the charge stored during the charge process is expressed as a percentage of the initial charge versus the charge current is shown; the continuous line indicates simulation results, while the cross indicate experimental results.

- Series of discharges using a standard discharge cycle

This series of discharges has been carried out using the current cycle shown in fig. 6, related to the battery current stress of an electrical vehicle during an urban trip. The purpose of the test is to show the influence of pauses to the total charge extracted. This charge was evaluated at an ambient temperature of 25°C, starting from a full charge and stopping when battery voltage and cycle current were 1.7V and 120A respectively.

The result of the simulation is compared with experimental data in fig 6 in which charge extracted, energy extracted, and total temperature raise are shown versus the time t_p .

5. Conclusions

The mathematical model presented in the paper can offer a good description of the behaviour of the lead-acid battery during both static and dynamic conditions. The response is given in terms of voltage across the terminals, state-of-charge, electrolyte temperature.

The range of validity of the model can fulfil satisfactorily most applications of the lead-acid battery.

The identification of the parameters of this model can be performed on the basis of a limited number of simple tests and requires suitable algorithms to process measured values.

On the other hand it must be noted that it is always possible to simplify both model formulation and parameters identification every time a model response over a smaller frequency domain can be accepted, by simply deleting one or more time constants.

References

- [1] R. Giglioli, P. Pelacchi, V. Scarioni, A. Buonarota, P. Menga: "Battery model of charge and discharge processes for optimim design and management of electrical storage systems", 33rd International Power Source Symposium, Cherry Hill, June 1988;
- [2] R. Buccianti, R. Giglioli, P. Menga, L. Thione: "An electrical model of the lead-acid battery", EVS 7, Versailles, june 1984;
- [3] H. Bode: "Lead acid batteries", J. Wiley & Sons, 1977;



- [4] A. Buonarota, P. Menga, V. Scarioni "An electrical model for discharge and recharge of lead-acid batteries, developed for industrial applications", L'energia Elettrica, N. 7-8, 1987.
- [5] G. Betta, N. Polese: "An equivalent model of batteries for electric vehicles", Drive Electric Italy, Sorrento, october 1985
- [6] R. Giglioli, G. Zini, M. Conte, M. Raugi: "An optimal control of photovoltaic systems by a new battery state-of-charge observer", 33rd International Power Source Symposium, Cherry Hill, June 1988; .
- [7] The MathWorks inc.: "Matlab", Identification toolbox

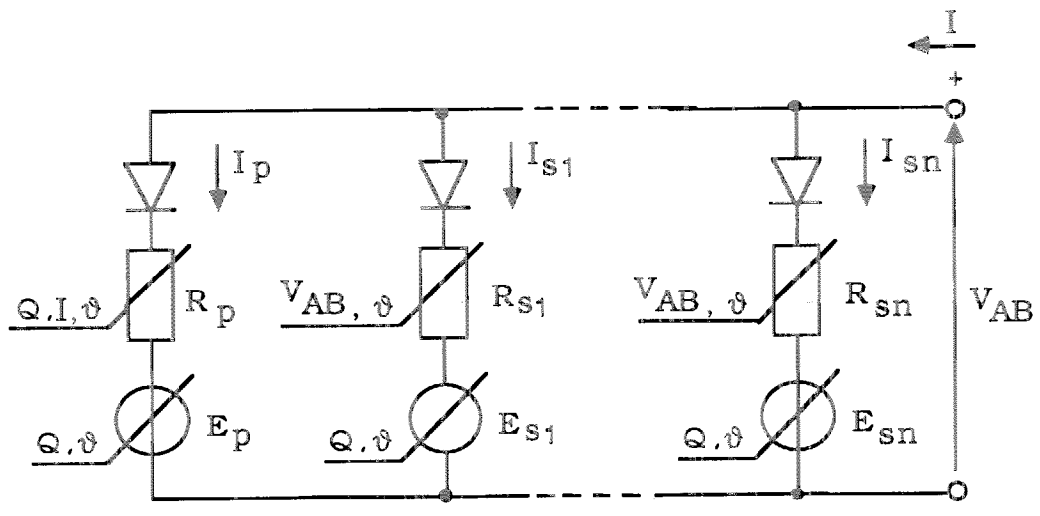


Fig. 1: Network equivalent of an electrochemical accumulator

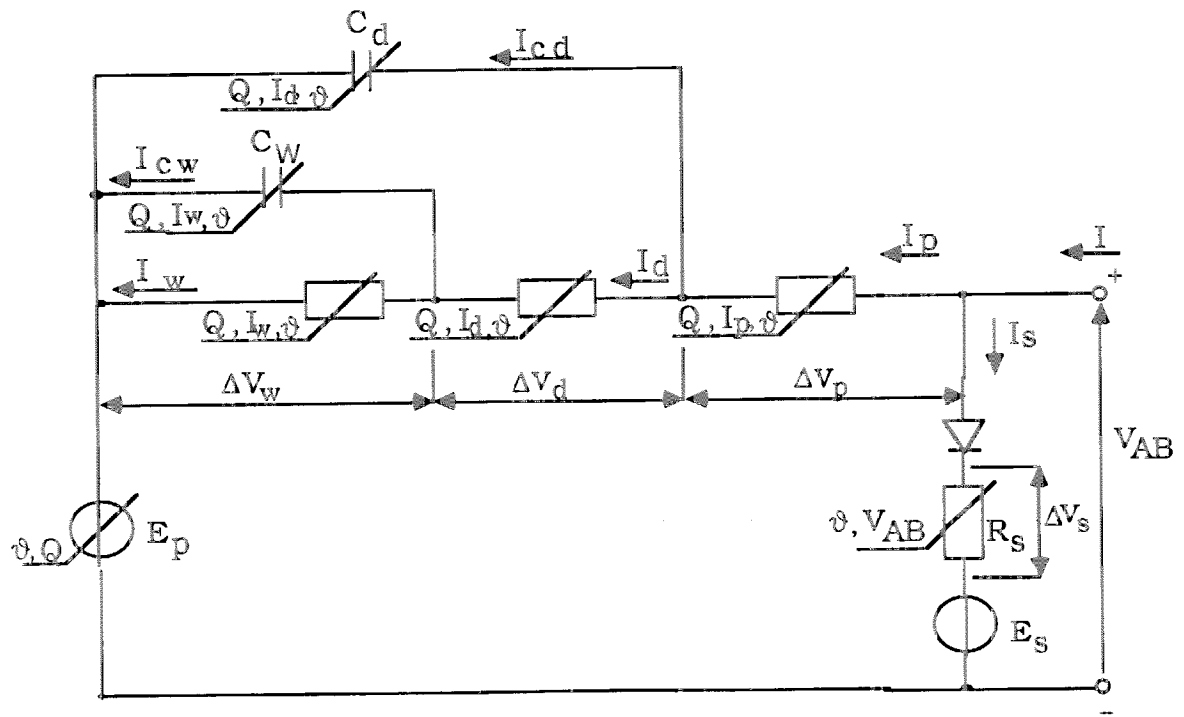


Fig. 2: Network equivalent of a lead-acid battery

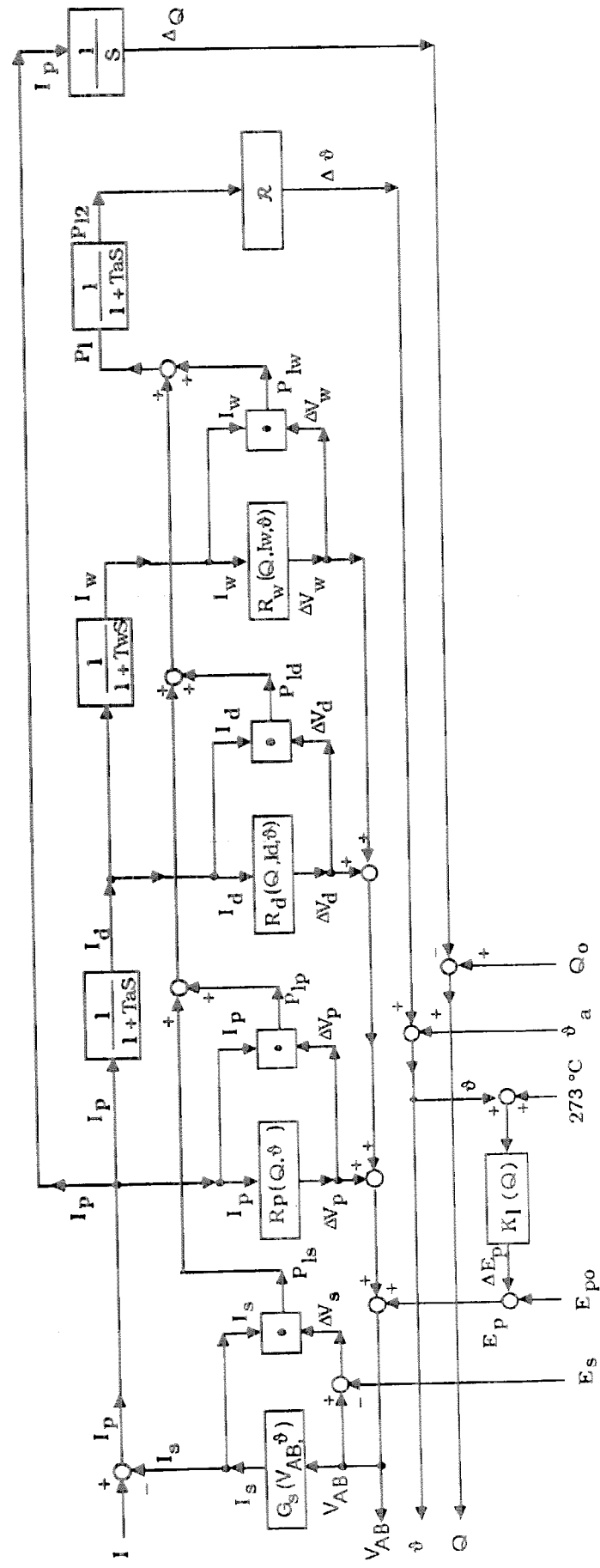


Fig. 3: bloch diagram showing model signal flows

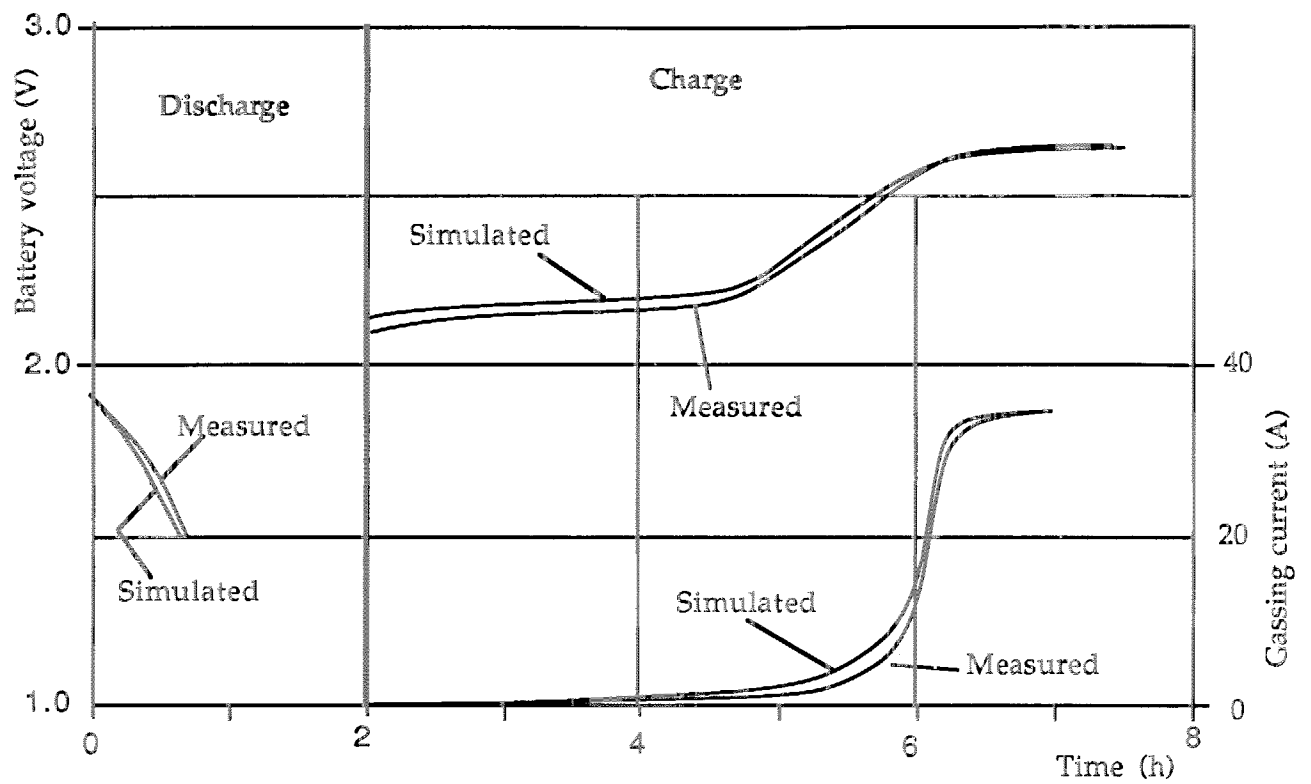


Fig. 4: Constant current discharge (220A) followed by a constant current charge (34A). Comparison between simulation and lab tests.

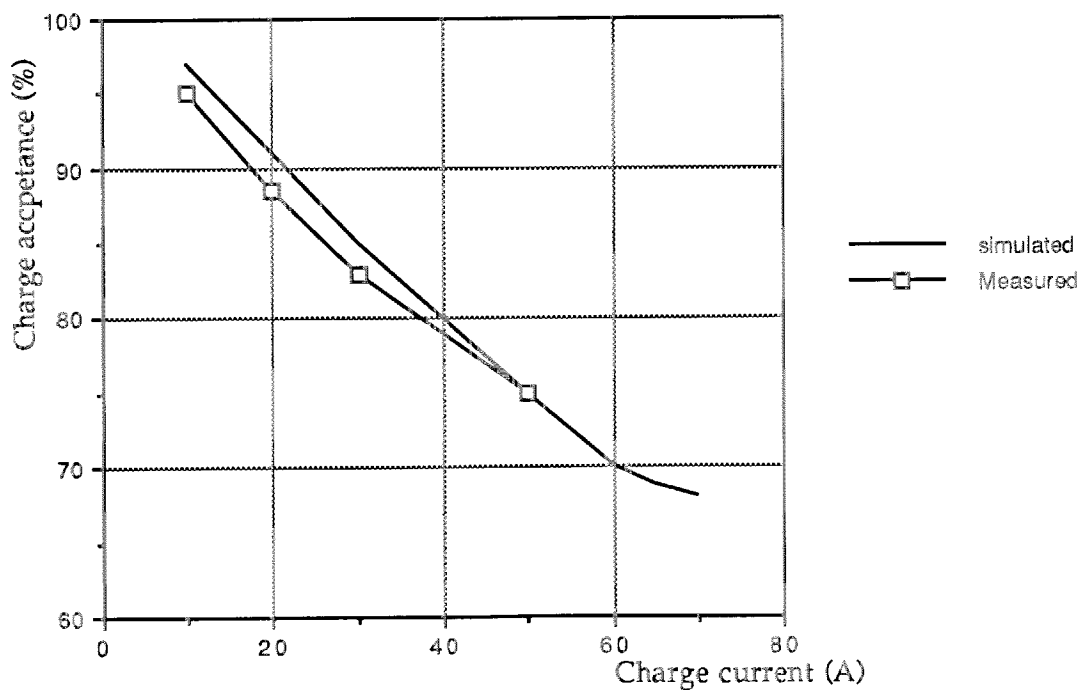


Fig. 5: Charge acceptance at different levels of charge current

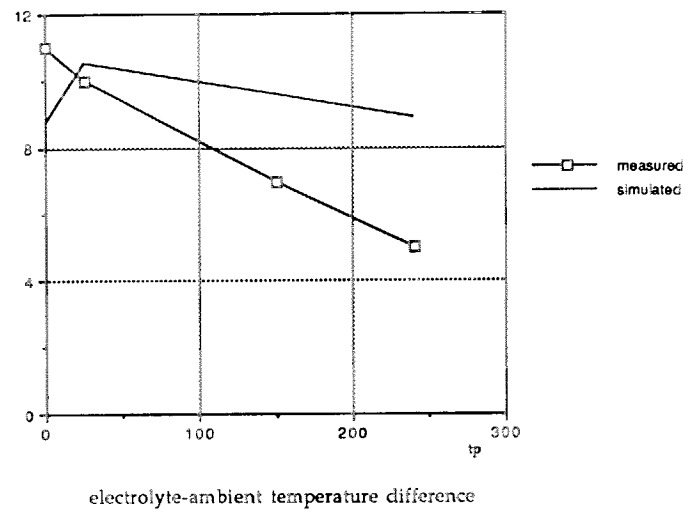
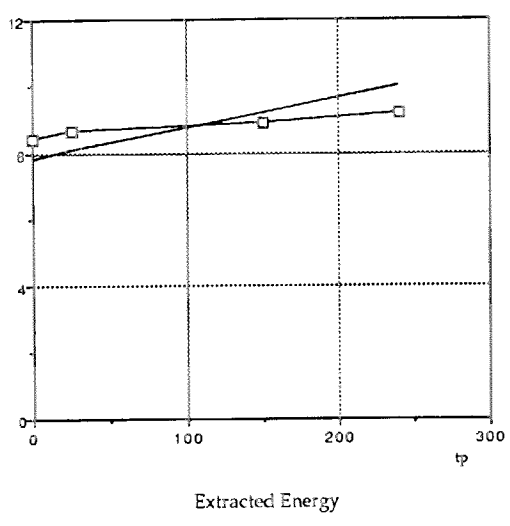
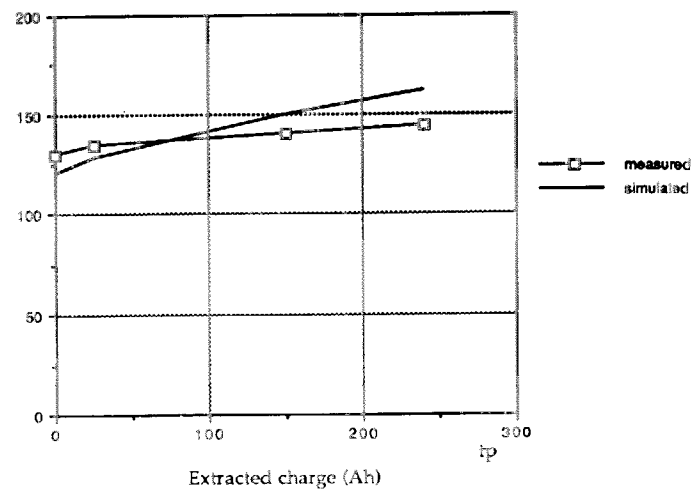
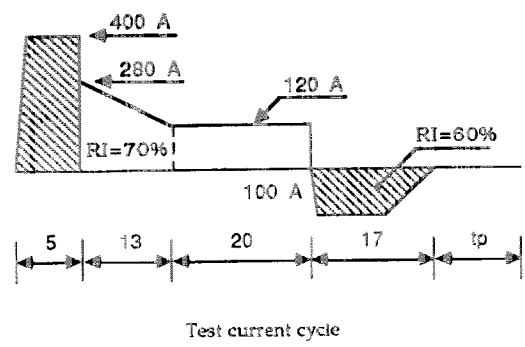


Fig. 6: Simulation and laboratory tests with standard discharge cycle

Anexo II

New Dynamical Models of Lead–Acid Batteries

Massimo Ceraolo

Abstract—This paper documents the main results of studies that have been carried out, during a period of more than a decade, at University of Pisa in co-operation with other technical Italian institutions, about models of electrochemical batteries suitable for the use of the electrical engineer, in particular for the analysis of electrical systems with batteries.

The problem of simulating electrochemical batteries by means of equivalent electric circuits is defined in a general way; then particular attention is then devoted to the problem of modeling of Lead–Acid batteries.

For this kind of batteries general model structure is defined from which specific models can be inferred, having different degrees of complexity and simulation quality.

In particular, the implementation of the third-order model, that shows a good compromise between complexity and precision, is developed in detail.

The behavior of the proposed models is compared with results obtained with extensive lab tests on different types of lead–acid batteries.

Index Terms—Batteries, modeling.

I. INTRODUCTION

ELECTROCHEMICAL batteries are of great importance in power systems because they give at the disposal of the electric engineer a means for storing small quantities of energy in a way that is immediately available. Some of the main battery uses, that have grown fast during last decade, are:

- batteries within Uninterruptable Power Supplies (UPS)
- Battery Energy Storage Plants (BESP) to be installed in power grids with the purpose of compensating active and reactive powers (in this sense they are an extension of the SVCs, and therefore are sometimes called also SWVCs). (Compare all the Batteries for Utility Energy Storage, the more recent being [10].)
- batteries of the main energy source of electric vehicles. (Compare all the Electric Vehicle Symposia, the two more recent being [13] and [14].)

Largely the more widespread batteries are the Lead–acid ones, in the two main kinds of flooded and Valve-regulated types.

Despite of these important, and growing, fields of interest, there still is a noticeable lack of battery models, expressed in a way manageable for the electrical engineer.

In fact, although there exist some models developed by experts of chemistry [1]–[5], they are too complex for a practical every-day use of the electrical engineer; in addition, they are not expressed in terms of electrical networks, that would help the electrical engineer to exploit his know-how in the analyzes.

The electrical engineer would take advantage of a sufficiently simple although accurate battery model in several ways, such as:

- simulation of the battery behavior in different conditions, instead of setting-up costly lab experiments;
- computation of useful parameters, often not available from the battery such as short circuit currents, constant power outputs at different time ranges, etc.

All this kept into account, the author has been working for several years, along with other researchers, in the field of modeling electrochemical batteries, mainly lead–acid ones, in terms of equivalent electrical networks [6], [11].

Over the years these models have been continuously checked with experimental results, and improved in several ways. In particular, efforts have been done in the direction of simplify their use, and defining particularized models set-ups apt for specific battery usage types.

The present paper shows the result of this lengthy process of revision of battery models, i.e., it proposes a general model formulation and a particular implementation that shows a good compromise between complexity and accuracy; some experimental checks of the model accuracy are also presented.

II. ELECTRICAL EQUIVALENTS OF ELECTROCHEMICAL BATTERIES

The main idea behind the models of electrochemical batteries presented in this paper is to simulate them by means of an electric analogy, i.e., to use networks formally composed by the usual electrical components: electromotive forces, resistors, capacitors, inductors, etc.

This would help the electric engineer in analyzing the battery behavior, since it can utilize his basic knowledge to analyze the internal phenomena of the battery.

The idea of the simulation of batteries by means of electric networks is not new in literature (cf. [9], [16]); however, in the present paper instead of trying to model by means of electric elements the single parts of the battery (electrodes, electrode/electrolyte interface, electrolyte, etc.) a different approach is followed: trying to find an electrical model that interpolates at best the battery behavior as seen from the terminals. This approach has been followed by the author in the past [8], although the already published models are not at the level of refinement of those proposed in this paper.

Since the battery is an electric bipole, were it linear, its more natural model would be constituted by an electromotive force in series with an internal impedance, both function of the Laplace variable s (Fig. 1). In addition, if the charge efficiency were equal to unity, the charge stored internally as a consequence of a current I entering the battery would be the integral of I itself.

This approach has two main issues:

Manuscript received November 30, 1998; revised July 12, 1999.

The author is with the Department of Electrical Systems and Automation, University of Pisa, Pisa, Italy.

Publisher Item Identifier S 0885-8950(00)10346-3.

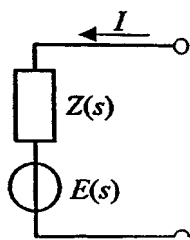


Fig. 1. Simple battery electric equivalent.

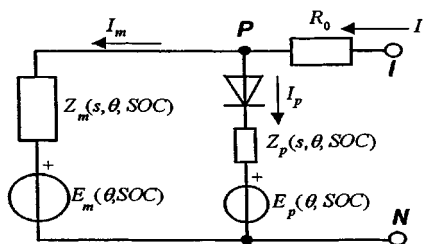


Fig. 2. Battery electric equivalent taking into account a parasitic reaction.

- 1) the battery behavior is far from being linear; in particular the internal elements E and Z are function at least of the battery state of charge and electrolyte temperature;
- 2) in general the charge efficiency cannot be considered equal to 1.

On the other hand, the dependence of E on s can be dropped.

To tackle these issues, the electric network can be modified as indicated in Fig. 2, where:

- θ represents a measure of the electrolyte temperature;
- SOC is a measure of the battery state-of-charge (later on details will be given on this quantity).

In this model the charge stored in the battery is the integral of only a part I_m of the total current I entering the battery; therefore the parasitic branch (subscript p) models nonreversible, parasitic reactions often present in the battery, that draw some current that does not participate at the main, reversible, reaction. The voltage that feeds the parasitic branch is near to battery voltage at the pins, separated from the latter by only a resistance, called R_0 in figure.

The energy that enters the e.m.f. force E_p abandons the state of electric power, and is converted into other forms of energy. For instance, for lead-acid batteries, the parasitic branch models the water electrolysis that occurs at the end of the charge process and the energy entering E_p is absorbed by the reaction of water dissociation.

The power dissipated in the real parts of impedances Z_m and Z_p is converted into heat, that contributes to the heating of the battery itself.

The electric network represented in Fig. 2 constitutes the basis on which the battery models presented in this paper are built. To build usable models there is the need of:

- explicit determination of the functional relations reported in the scheme, i.e., functional dependence of the E 's and Z 's on s, θ and SOC ;
- determination of a battery thermal model so that, starting from information on the temperature of the air surrounding the battery and some computation of the heat generated

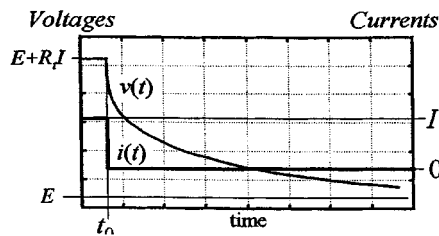


Fig. 3. Battery voltage response to a current stepping from I (constant) to 0.

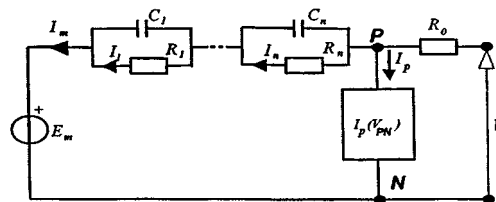


Fig. 4. Lead-acid battery equivalent network.

internally, the electrolyte temperature (measured for simplicity by a unique value θ) can be computed.

The dependence of the impedances of Fig. 2 on s can be stated implicitly by defining for each of them equivalent $R-L-C$ networks, whose impedance as a function of s is equal to the impedance modeled.

III. SIMULATION OF LEAD-ACID BATTERIES

A. Electric Networks

The job of making a specific version of the model represented in Fig. 2 for a specific type of battery is simplified if there is some *a priori* knowledge of operating conditions in which the parasitic branch p is not active (draws a negligible current).

This is the case of lead-acid batteries. In fact, it is well known that these batteries have a charge efficiency very near to unity when the battery voltage is well below a threshold on the battery voltage, which is around 2.3 V per cell.

1) *Main (Reversible) Reaction Branch:* Under the hypothesis that the parasitic reactions are inactive, and therefore the parasitic reaction branch p shown in Fig. 2 draws no current, the main branch of the model can be identified by looking at the battery step responses, measured at different values of state-of-charge and electrolyte temperature.

A sample battery response to a step current (from $I = \text{const}$ to 0) is shown in Fig. 3.

Depending on the requested precision, this response can be approximated by a sum of exponential curves, with different time constants, plus a term proportional to the step current I :

$$v(t) = E + R_t I \quad t \leq t_0$$

$$v(t) = E + R_1 I e^{-t/\tau_1} + \dots + R_n I e^{-t/\tau_n} \quad t > t_0$$

The same response can be obtained subjecting to the same step current the circuit represented in Fig. 4 (in which the branch between nodes **P** and **N** is neglected), where

$$C_i = \tau_i / R_i \quad (i = 1, \dots, n), \quad R_0 = R_t - \sum_{i=1}^n R_i.$$

However, as already noted, the elements of this circuit are not constant, since they depend on the battery state-of-charge and electrolyte temperature (with a good degree of approximation, however, the quantities $\tau_k = R_k C_k$ can be kept constant).

In addition, partially deviating from the problem proposition of Section II, to accurately describe the battery behavior a dependence of the instantaneous value of one of the resistances R_i on the instantaneous value of the current flowing inside should be added.

The process of identification is therefore very complex, and fast increasing with the number of the R - C blocks considered in the model.

However, a particular installation of a battery is normally characterized by a specific speed of evolution of the electric quantities: e.g., there are installations in which the quantities evolve very rapidly (e.g. the electric vehicles), and other in which they are rather slow (many industrial applications).

In all these cases the model is requested to be very accurate only with specific currents/voltages shapes, and the number of R - C blocks can therefore be kept limited (just one or two), given that their dynamic behavior is optimized with the more frequent current/voltage shapes.

If, on the contrary, the same battery is to be utilized in situations widely different from each other, more blocks are needed even if this complicates the identification of the numerical values of parameters.

2) *Parasitic Reaction Branch*: The parasitic reaction branch is of the type reported for in Fig. 2.

Experiences conducted on several lead acid batteries, however, have shown that Z_p can be assumed to be a simple resistor, without dependence on the Laplace variable s , and *SOC*.

On the other hand, a linear model as represented in Fig. 2 is unrealistic, since the dependence of the current I_p on the voltage V_{PN} is strongly nonlinear.

It seems to be therefore better to express this branch in a way that evidences its algebraic and nonlinear nature, as in Fig. 4.

Electric Network for Modeling Charge and Discharge Processes: As a consequence of the above considerations a network able to model both charge and discharge processes is shown in Fig. 4.

A particularity of the main reaction branch that has not been discussed yet is that when the battery is nearly full the impedance of the main reaction branch becomes greater and greater; this results in an increase of the voltage at the parasitic branch terminals, which in turn causes a rise of the current I_p . This phenomenon can be described in the proposed model by means of the dependence of R_i , C_i on *SOC*. In particular, a good interpolation of experimental results is obtained if one of the R - C blocks, say the block n , is considered as having $C_n = 0$ and $R_n = R_n(\text{SOC})$ so that R_n approaches to infinity as far as the battery approaches to a full state.

B. Capacity, State-of-Charge and Electrolyte Temperature

According to what has been previously stated, the battery modeling requires the identification of several circuit elements (those reported in Fig. 4) under different values its State of charge.

Since the definitions of this quantity of different authors are often different [2], [3], [16], a precise definition of it is needed before detailing the relationship of the electric elements of the proposed equivalent networks and the state-of-charge.

To define the battery state-of-charge, a good starting point is the analysis of the battery capacity as a function of electrolyte temperature and discharge current.

It is well known that the charge that can be drawn from a lead-acid battery with a constant discharge current at a constant electrolyte temperature is higher with higher electrolyte temperatures and lower discharge current. It depends also on the voltage reached at the end of the considered discharge to measure the capacity.

At a fixed discharge current I ,¹ (and fixed end-of-discharge voltage)² the dependence of the capacity on the electrolyte temperature θ (expressed in °C and supposed constant) can be expressed with a good approximation by:

$$C(I, \theta)_{I, \theta = \text{const}} = C_0(I) \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon \quad (\theta > \theta_f) \quad (1)$$

where:

- θ_f is the electrolyte freezing temperature that depends mainly on the electrolyte specific gravity, and can normally be assumed as equal to -40°C .
- $C_0(I)$ is an empirical function of discharge current and is, obviously, equal to the battery capacity at 0°C ;

Obviously, the (1) is such that the capacity tends to zero when θ approaches to θ_f , since when the electrolyte is frozen the battery is not able to deliver any current.

Experimental results show [6]–[8] that $C_0(I)$ can be expressed as a function of a reference current I^* by:

$$C_0(I) = \frac{K_c C_{0^*}}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (2)$$

where it has obviously been assumed $C_{0^*} = C_0(I^*)$. K_c and δ are an empirical coefficients, constant for a given battery and a given I^* . Eq. (2) gives good results in a wide range of currents around I^* ; therefore, a good choice of I^* is a current that flows in the battery for a typical use, e.g., the nominal current I_n , defined as the ratio of the nominal capacity C_n and the nominal discharge time T_n . The range of currents for which the (2) gives good results is sufficiently large so that a unique value of I^* is normally chosen for a given battery application.

Eqs. (1) and (2) can be combined into:

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_{0^*} \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (3)$$

¹Positive when exiting the battery, differently from the positive signs indicated in Figs. 1 and 2.

²In particular, according to some international standards (CENELEC EN 60 896-1), 1.8 V/element has been assumed. The charge that can be extracted at end-of-discharge voltages different from this value can be obtained simulating the battery behavior by means of one of the models presented in this paper.

A rapid comparison between (2) and the frequently adopted Peukert's equation (cf. [3]):

$$I^n T = \text{const}$$

shows that, although more complicated, (2) overcomes the chief inadequacies of Peukert's equation, i.e., the lack of consideration of the temperature, and the fact that in correspondence to low currents it predicts capacities much larger than those experimentally obtainable (up to infinite capacity at zero current).

Equations (1) and (2) have been declared valid when electrolyte temperature and discharge current are constant.

During transients it can be postulated that they are still valid given that instead of the real battery current $i(t)$ a filtered value of this current I_{avg} is used.

This hypothesis has been experimentally confirmed, and is assumed in this paper; in particular, good results are obtained taking $I_{avg} = I_k$ where I_k is the current flowing in one of the resistors R_k (the actual k depends on the particular model considered), and it is $I_k = I_m / (1 + \tau_k s)$, $\tau_k = R_k C_k$.

When simulating the battery using this model, the capacity must be on-line adapted to the computed actual electrolyte temperature and average current: $C = C(I_{avg}, \theta)$.

A per unit measure of the level of the discharge of a battery has to correlate the charge Q_e that has been actually extracted from the battery starting from a battery completely full with the charge that can be extracted under given, standard conditions.

In the models proposed in this paper two different numbers are used to quantify the level of discharge of the battery:

- state-of-charge $SOC = 1 - Q_e / C(0, \theta) = 1 - Q_e / (K_c C(I^*))$
- depth-of-charge $DOC = 1 - Q_e / C(I_{avg}, \theta)$

where $Q_e(t) = \int_0^t -I_m(\tau) d\tau$ (supposed that when $t = 0$ the battery is completely full).

The physical meaning of SOC and DOC is quite simple: while the first one is an indicator of how full is a battery with reference to the maximum capacity the battery is able to deliver at the given temperature θ , the second one is an indicator of how full is the battery with reference to the actual discharge regime (i.e., the value of the constant discharge current I , or, in case of variable current the value of I_{avg}).

1) *Electrolyte Temperature*: It has been stated in Section II that the elements of the electric equivalents of electrochemical have to be computed for each electrolyte temperature. In fact, since the batteries are extensive components, each electrolyte point has a temperature of its own.

However, to avoid this additional complexity, in the proposed model a unique value has been assumed, that is somehow an equivalent of the whole temperature map.

Then, the dynamic equation that allows the electrolyte temperature computation is, simply:

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_a}{R_\theta} + P_s \quad \text{or, equivalently:}$$

$$\theta = \frac{P_s R_\theta + \theta_a}{1 + R_\theta C_\theta s}$$

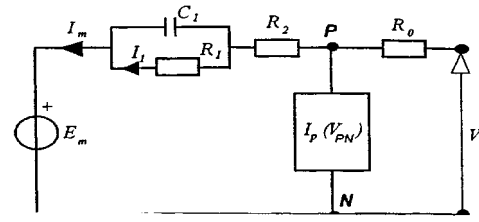


Fig. 5. Equivalent electric network used for the third-order battery model.

where:

- C_θ is the battery thermal capacitance
- θ is the electrolyte temperature
- R_θ is thermal resistance between the battery and its environment
- θ_a is the ambient temperature i.e., the temperature of the environment (normally air) surrounding the battery
- P_s is source thermal power, i.e., the heat that is generated internally in the battery
- s is the variable of the Laplace transform.

When a battery module contains more than one element, a unique temperature for the electrolyte of the whole module can be utilized.

C. Model Parameters

It has been previously stated that the battery can be simulated by electric networks of the types shown in Fig. 4, in which the numerical values of the elements of these networks have to be computed for each value of electrolyte temperature and state-of-charge. Obviously, in practice they can be computed only for discrete values of these two quantities, and the values between are to be obtained by means of some form of interpolation.

To simplify the task, a large amount of lead-acid battery data have been processed to find analytical functions able to reproduce the typical behavior of the elements of Fig. 4, (i.e. e.m.f.'s, C 's, R 's) as function of SOC and/or DOC , and θ . These functions contain some numerical coefficients (The "model parameters") to be computed based on experimental battery tests.

In the following paragraph, these analytical functions are reported, with reference to one of the possible models that can be built based on the electric equivalent of Section III-A, i.e., that in which two $R-C$ blocks are present.

D. Third-Order Model Formulation

Among the several possibilities given by the modeling techniques described in the previous paragraphs one of the most suitable for general-purpose modeling is constituted by:

- an electric equivalent with two $R-C$ blocks and an algebraic parasitic branch (Fig. 5);
- algorithms for computing the state of charge and internal (electrolyte) temperature
- equations for computation of the elements of the equivalent electric network as function of state of charge and temperature.

The assumed state variables are the currents I_1 and I_2 , and the extracted charge Q_e and electrolyte temperature θ . The dynamic equations of the model are therefore:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (I_m - I_1) \quad \frac{dQ_e}{dt} = -I_m$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{C_\theta} \left[P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right]$$

where $\tau_1 = R_1 C_1$ and the other quantities have the previously reported meaning.

The assumed equations for E_m , R_0 , R_1 , R_2 , are:³

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22}I_m/I^*)}$$

where E_{m0} , K_E , R_{00} , A_0 , R_{10} , R_{20} , A_{21} , A_{22} are constant for a particular battery (later some information on how to determine these numbers will be given). DOC and SOC are as defined in Section III-B, and the current to be utilized in the expression of the capacity $C(I, \theta)$ is $I_{avg} = I_1$.

The behavior of the parasitic branch is actually strongly nonlinear. Therefore it is better to use, instead of R_p , an expression of I_p as a function of V_p . The following equation can be used, that matches the Tafel gassing-current relationship [7]

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

or, equivalently:

$$I_p = G_p V_{PN} \quad G_p = G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

These expressions contain the parameters G_{p0} , V_{p0} , A_p , that are constant for a particular battery. In case of recombination batteries the Tafel relationship, and therefore the above reported expression of I_p is valid only up the recombination limit; this is not a strong limitation since this limit should never be overcome (otherwise the battery is irreversibly damaged).

Although the strong nonlinearity of the parasitic reaction branch reduces a lot the physical meaning of e.m.f. E_p and resistor R_p , it can be written (cf. Fig. 2):

$$E_p = \text{const} = E_{p0} \quad R_p/(V_{PN} - E_p)/I_p$$

The computation of R_p allows the computation of the heat produced by the parasitic reactions, by means of the Joule law: $P_{sp} = R_p I_p^2$. For recombination batteries all the power entering the parasitic reactions branch, therefore it is $E_{p0} = 0$.

It is important to note that since during discharge $R_2 \cong 0$ and $I_p \cong 0$, if only the discharge behavior is to be simulated, the resistor R_2 and the whole parasitic branch can be omitted from the model.

The equations of the proposed model formulation contain some constants whose numerical values are in principle to be determined for each battery by means of lab tests. The whole

³Needless to say, $273 + \theta$ indicates the electrolyte temperature measured in Kelvin.

set of numerical constants that define all details of the model for a particular battery is composed as follows.

Parameters referring to the battery capacity	$C_{0^*}, K_c, \theta_f, \varepsilon, \delta$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$E_{m0}, K_E, \tau_1, R_{00}, R_{10}, A_0, R_{20}, A_{21}, A_{22}$
Parameters referring to the parasitic reaction branch of the electric equivalent	E_p, V_{p0}, A_p
Parameters referring to the battery thermal model	C_θ, R_θ

1) *Identification of Model Parameters:* Given the large of number of parameters of the proposed model, the complete identification of all of them is particularly complex. However, the following considerations apply:

- as already noted for discharge modeling only, R_{20} , A_{21} , A_{22} , $E_p V_{p0}$, A_p do not need to be computed;
- the a dimensional parameters (i.e., K_c , ε , δ , A_{21} , A_{22} , A_p) vary a little among different batteries built with the same technology, and as a first approximation the values reported in the Appendix can be utilized;
- when batteries of the same manufacturer and model (and different nominal capacities) are considered, the parameters having the dimensions of a resistance can be approximately taken as inversely proportional to nominal capacities.

The problem of individuation of the numerical values of all the battery parameters, as well as some techniques to reduce the difficulty of this task, is analyzed in detail in a different paper that will be soon submitted for publication.

IV. MODEL VALIDATION

The models presented in this paper have been validated by means of many lab tests made on lead-acid batteries of several types (flooded, gelled, Valve-Regulated).

A specialized model for Sodium-Sulfur batteries, based on the general principles discussed in Section II has also been successfully checked with lab tests [11].

The model validation is strictly related to the problem of model parameters identification, that will be tackled in detail in a different paper. However, just to give some examples, hereafter the comparison of simulated and measured voltage shape for two batteries for simple transients is reported.

The considered batteries are:

- Battery 1: valve-regulated lead acid (gelled), $C_{10} = 500$ Ah
- Battery 2: flooded lead acid, $C_{10} = 500$ Ah

The behavior of these batteries can be simulated using the third-order formulation of the battery models presented in this paper and the parameters reported in the Appendix.

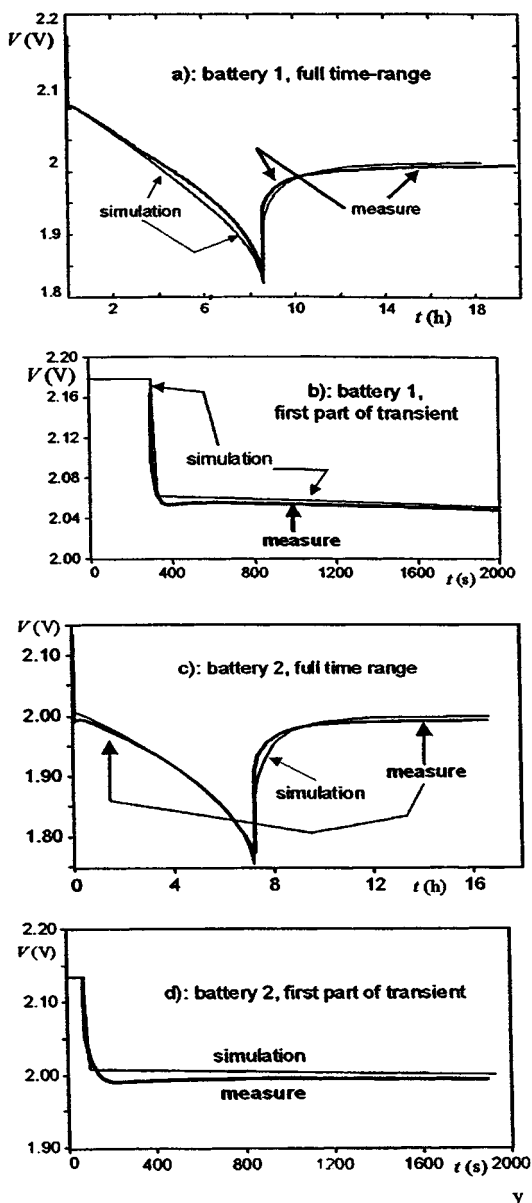


Fig. 6. Comparison of simulated and measured battery voltage for a constant-current discharge up to 1.75 V followed by a period in which the current is constantly null.

In Fig. 6 the simple transient constituted by a constant-current discharge up to a element voltage equal to 1.75 V followed by a period in which the current is constantly null is considered. In all the plots the voltage of a single battery element, both simulated and measured are shown.

Fig. 6(a) and (b) refer to battery 1. The current is equal to 58 A for a duration of 8.6 h, then it is 0.

Fig. 6(c) and (d) refer to battery 2. The current is equal to 63 A for a duration of 7.2 h, then it is 0.

Both figures show a good agreement of measured and simulated shapes.

For battery 2, the model is checked also during the charge process. The comparison of measured and simulated voltage for a 53 A charge (starting from a completely empty battery) is shown in Fig. 7.

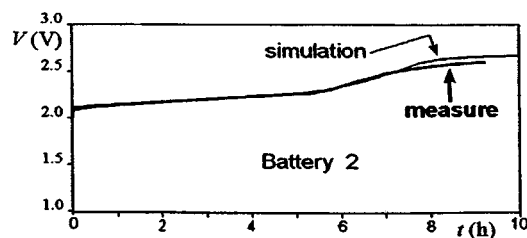


Fig. 7. Comparison of simulated and measured battery voltage during charge (battery 2).

Again, a good agreement of simulated and measured curves is shown, although the model shows some difficulty of integration when the battery is nearly full.

V. CONCLUSION

- The complex, nonlinear behavior of electrochemical batteries can be conveniently modeled using equivalent electric networks. Although these networks contain elements that are nonlinear and depend on battery state-of-charge and electrolyte temperature, they are very useful for the electric engineer, since they allow to think in terms of electric quantities, instead of internal battery electrochemical reactions.
- The third-order model proposed has an accuracy satisfactory for the majority of uses; for particular situations more sophisticated models can be derived from the general model structure proposed in the paper.
- The proposed model can be used for several purposes; the more important fields of application are:
 - computer simulation of battery behavior under different operating conditions (possibly containing both charge and discharge processes);
 - management of on-line systems containing electrochemical batteries: state-of-charge estimation, battery monitoring and diagnostics; estimate of residual range of electric vehicles [12], [15].
- The use of the proposed models, in particular the third-order formulation, is complicated by the fact that the proposed equations contain several parameters that have to be identified. This identification can however be simplified a lot since some of the parameters can be taken as constant for all the batteries built with the same technology.

APPENDIX

MODEL PARAMETERS USED FOR SIMULATIONS

TABLE I
PARAMETERS OF BATTERY 1 (ONLY PARAMETERS NEEDED FOR DISCHARGE SIMULATIONS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 51.5 \text{ A}$ $K_c = 1.11$ $\epsilon = 1.19$	$C_0 = 317.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.75$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_f = 7200 \text{ s}$ $K_E = 0.839e-3 \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.20$	$E_{m0} = 2.18 \text{ V}$ $R_{f0} = 0.4 \text{ m}\Omega$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_\theta = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_\theta = 0.2^\circ\text{C/W}$

TABLE II
PARAMETERS OF BATTERY 2 (ALL PARAMETERS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 49 \text{ A}$ $K_c = 1.18$ $\varepsilon = 1.29$	$C_0 = 261.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.40$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_f = 5000 \text{ s}$ $K_E = 0.580e-3 \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.30$ $A_{21} = -8.0$	$E_{m0} = 2.135 \text{ V}$ $R_{f0} = 0.7 \text{ m}\Omega$ $R_{20} = 15 \text{ m}\Omega$ $A_{22} = -8.45$
Parameters referring to the parasitic reaction branch of the electric equivalent	$E_p = 1.95 \text{ V}$ $G_{p0} = 2 \text{ pS}$	$V_{p0} = 0.1 \text{ V}$ $A_p = 2.0$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_\theta = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_\theta = 0.2 \text{ }^\circ\text{C/W}$

ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank Prof. R. Giglioli for his guidance during the past years on the field of battery modeling, and F. Buonsignori for his intelligent contribution to all the lab tests on which this paper is based.

REFERENCES

- [1] M. Shepard, "Design of primary and secondary cells, an equation describing battery discharge," *Journal Electrochemical Society*, July 1965.
- [2] K. J. Vetter, *Electrochemical Kinetics*, 1967.
- [3] H. Bode, *Lead-Acid Batteries*: J. Wiley & Sons, 1977.
- [4] L. Gopikanth and S. Sathyanarana, "Impedance parameters and the state-of-charge," *Journal of Applied Electro-Chemistry*, pp. 369–379, 1979.
- [5] G. Smith, *Storage Batteries*. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- [6] R. Giglioli, P. Pelacchi, V. Scarioni, A. Buonarota, and P. Menga, "Battery model of charge and discharge processes for optimum design and management of electrical storage systems," in *33rd International Power Source Symposium*, June 1988.
- [7] H. P. Schoner, "Electrical behavior of lead/acid batteries during charge, overcharge, and open circuit," in *9th Electric Vehicle Symposium (EVS-9)*, 1988, N. 063.

- [8] R. Giglioli, A. Buonarota, P. Menga, and M. Ceraolo, "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery," in *The 10th International Electric Vehicle Symposium*, Hong-Kong, Dec. 1990.
- [9] S. A. Ilangovan, "Determination of impedance parameters of individual electrodes and internal resistance of batteries by a new nondestructive technique," *Journal of Power Sources*, vol. 50, pp. 33–45, 1994.
- [10] *Fifth International Conference on Batteries for Utility Energy Storage*, Puerto Rico 1995, July 18–21, 1995, 18-21 luglio.
- [11] M. Ceraolo, A. Buonarota, R. Giglioli, P. Menga, and V. Scarioni, "An electric dynamic model of sodium sulfur batteries suitable for power system simulations," in *11th International Electric Vehicle Symposium*, Florence, Sept. 27–30, 1992.
- [12] G. Casavola, M. Ceraolo, M. Conte, G. Giglioli, S. Granella, and G. Pede, "State-of-charge estimation for improving management of electric vehicle lead-acid batteries during charge and discharge," in *13th International Electric Vehicle Symposium*, Osaka, Oct. 1996.
- [13] *Proceedings of the Fourteenth Electric Vehicle Symposium*, vol. EVS-14, Orlando, USA, Dec. 15–17, 1997.
- [14] *Proceedings of the Fifteenth Electric Vehicle Symposium*, vol. EVS-15, Brussels, Belgium, Sept. 29–Oct. 3, 1998.
- [15] M. Ceraolo, D. Prattichizzo, P. Romano, and F. Smargrasso, "Experiences on residual-range estimation of electric vehicles powered by lead-acid batteries," in *15th International Electric Vehicle Symposium*, Brussels, Belgium, Sept. 29–Oct. 3, 1998.
- [16] H. L. N. Wiegman and R. D. Lorenz, "High efficiency battery state control and power capability prediction," in *15th Electric Vehicle Symposium*, vol. EVS-15, Brussels, Belgium, Sept. 29–Oct. 3, 1998.



Massimo Ceraolo (1960) received the degree in electrical engineering at the University of Pisa in 1985.

After the military service, from 1986 to 1991 he worked in the CRITA, (an engineering company) in activities of research and design of electric power systems. Some of his work of this period was in collaboration with of University of Pisa.

Since 1992, he is a Researcher of the "Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione" of University of Pisa.

His major fields of interest are active and reactive compensation of power systems, long-distance transmission systems, computer simulations in power systems, storage batteries.

Anexo III

Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues

Stefano Barsali and Massimo Ceraolo

Abstract—This paper explains how the lead-acid models described in a previous paper can be utilized in practice. Two main issues are opened by that paper: 1) The paper does not supply detailed information on how to identify the several parameters of the proposed models, and 2) it defines a whole family of models, but does not discuss which model of the family is adequate for a given purpose. These two issues are tackled in this paper. For the first issue, the more complex one, two options are proposed and discussed: 1) a complete identification procedure involving extensive lab tests and 2) a simplified one that combines information from lab tests and data supplied by the manufacturer. In addition, further simplifications applicable in cases of batteries belonging to the same family are presented.

Index Terms—Batteries, modeling, parameter estimation.

I. PROPOSED MODEL

IN THIS PAPER, the lead-acid battery model family described in detail in [11] is rapidly reported for reader's convenience.

The model can be represented by an equivalent electric network reported in Fig. 1, along with the dynamic equations representing the charge storage process and the electrolyte heating

$$Q_e(t) = \int_0^t -I_m(\tau) d\tau$$

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_e}{R_\theta} + P_s$$

where

- Q_e so-called “extracted charge,” i.e., the charge that has been actually extracted from the battery starting from a battery completely full (battery full when $t = 0$);
- C_θ and R_θ battery thermal capacitance and resistance, respectively;
- P_s heating power generated inside the battery by conversion from electrical or chemical energy.

It has to be remembered that the resistances R_k and capacitances C_k shown in Fig. 1 are function of the battery state-of-charge and electrolyte temperature. The equations defining these parameters are reported in the Appendix.

II. IDENTIFICATION OF MODEL PARAMETERS BY LAB TESTS

In the diagram of Fig. 2 the battery model is globally described as having the environment temperature θ_a and the bat-

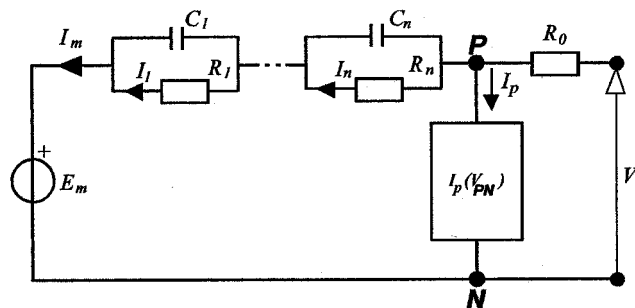


Fig. 1. Lead-acid equivalent network for both discharge and charge.

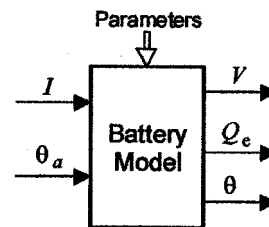


Fig. 2. Pictorial description of model interaction with the external world.

tery current as inputs, and the battery voltage as well as the extracted charge and electrolyte temperature as outputs.

It is in principle possible to determine all the parameters starting from a set of lab tests of a real battery, i.e., discharges and charges at different values of currents and environment temperatures and a digital simulator of the model.

If $V_m(t)$ indicates the measured voltage shape of a given test, and $V_s(t, \mathbf{p})$ indicates the simulated voltage referring to the same input signals and a given set of parameters \mathbf{p} , and err is a measure of the error between the two shapes, the elements of vector \mathbf{p} could in principle be obtained by solving the equation in \mathbf{p}

$$\text{err}(V_m(t), V(t, \mathbf{p})) = \min. \quad (1)$$

Examples of error functions are

$$\text{err}(x(t), y(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} (x(t) - y(t))^2 dt}$$

mean quadratic difference. (2)

$$\text{err}(x(t), y(t)) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} |x(t) - y(t)| dt$$

mean absolute difference. (3)

In practice, however, because of the great number of elements of \mathbf{p} and the strong complexity of the relationships between the \mathbf{p} elements and the battery behavior, it is very difficult that this

Manuscript received September 8, 2000.

The authors are with the Department of Electrical Systems and Automation, University of Pisa, Pisa, Italy.

Publisher Item Identifier S 0885-8969(02)01511-5.

process converge to reasonable results, if a brute-force approach is undertaken, i.e., if a general-purpose numerical algorithm is adopted for minimization of (1).

It is therefore advisable to simplify this task, by decomposing the problem into simpler subtasks for which the number of needed parameters is smaller. This is dealt with in the following paragraphs under some assumptions, generally satisfied, on the model structure.

Once the elements of \mathbf{p} are computed, an err function such as those reported in (2) and (3) can be used to check the validity of the results.

A. Parameters Referring to the Battery Capacity

The battery capacity is defined in the model by the following equation (see also Appendix):

$$C(I, \theta)_{I, \theta = \text{const}} = \frac{K_c C_{0^*} \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^\delta} \quad (4)$$

in which θ is the electrolyte temperature (in °C, supposed constant within the battery and during the discharge) and K_c , C_{0^*} , θ_f , ε , δ , I^* are parameters to be identified.

It is apparent that during real-life lab tests, even if performed in climatic chambers, the electrolyte temperature is different in different electrolyte points and varies along with time as well. For the purpose of interpolation of capacity parameters, however, tests can be made under constant ambient temperature, and the temperature θ to be considered in (4) is an average of the electrolyte temperature. The average is to be in principle carried out over space and time. In practice the time-average of a single point temperature is sufficient.

This single point temperature, in case of flooded batteries, is the temperature measured in a point chosen so that it reasonably reflects the average electrolyte temperature. For the more complex case of VRLA batteries, experimental tests performed by the authors have shown that for the purpose of the interpolation of parameters of (4) the single-point temperature can be obtained by measuring the temperature of one of the battery pins.

The interpretation of the parameter I^* in (4) is quite simple as a consequence: it is a reference current able to make the basis of the power to δ an adimensional number. It is therefore reasonable to assume $I^* = I_n$, or, more generally, to equal I^* to a value representative of the typical usage of a given battery.

An experimental determination of the remaining five parameters would require, under the hypothesis normally acceptable of assigning to the electrolyte freezing temperature the value $\theta_f = -35^\circ\text{C}$, at least four tests made using two different (constant) currents I_1 and I_2 and two different temperatures θ_1 and θ_2 . If the equation of the capacity is utilized in conjunction with the four couples (I_1, θ_1) , (I_1, θ_2) , (I_2, θ_1) , and (I_2, θ_2) and the related measured capacities, a system of four equations in the four unknowns C_{0^*} , K_c , ε , and δ is determined. If more tests are available, the same parameters can be more effectively computed considering all tests and choosing the set of parameters that minimizes the error between measured and computed capacities.

Often the battery manufacturer gives information about the dependency of the capacity on the temperature by means of the

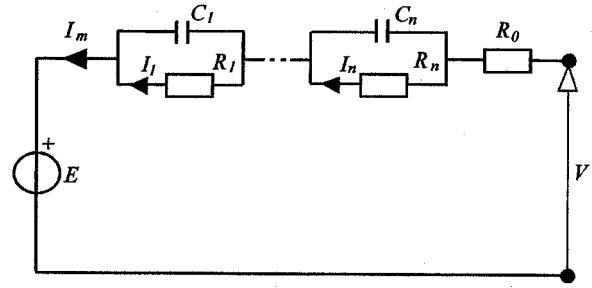


Fig. 3. Lead-acid equivalent network valid during discharge process.

temperature coefficient $\alpha = (1/C)(\partial C/\partial \theta)$, assumed to be constant.

According to the hypothesis of a constant α , to obtain a capacity at a different temperature and equal current of a given value $C(I, \theta_0)$, the simple relation $C(I, \theta) = (1 + \alpha \Delta \theta)C(I, \theta_0)$ can be used.

In all cases, the currents and temperatures to be chosen to perform the tests should be representative of the possible operating conditions foreseen for the battery. In fact, even if (4) interpolates quite well the battery behavior under wide ranges of currents and temperatures, it is obvious that for currents and temperatures very far from those used for parameter interpolation nonnegligible errors can occur.

B. Parameters Referring to the Main Branch of the Electric Equivalent

Consider the generic circuitual representation of lead-acid battery reported in Fig. 1.

In [11], that describes the model in detail, it has been stated that the so called *Parasitic Reaction Branch*, i.e. the branch in the electric circuit reported in Fig. 1 between P and N , draws a noticeable current only during the charge process (and at the end of it). Therefore, for the analyzes of tests in which only battery discharge is involved, it can be neglected. This is very useful in that it simplifies a lot the process of parameter identification.

Consider the discharge model represented in Fig. 3, in which, it has to be remembered, the resistances R_k and capacitances C_k are function of the battery state-of-charge and electrolyte temperature; in addition, each particular battery is characterized by a set of parameters that define the particular shape of these functions

$$\begin{aligned} E &= E(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_e) \\ R_k &= R_k(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_{rk}) \\ C_k &= C_k(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_{ck}) \end{aligned} \quad (5)$$

or, if it is assumed $\tau_k = R_k C_k$

$$\begin{aligned} E &= E(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_e) \\ R_k &= R_k(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_{rk}) \\ T_k &= T_k(\text{SOC}, \theta, \mathbf{p}_{tk}) \end{aligned} \quad (6)$$

where

- \mathbf{p}_e is the vector containing the details of the particular battery considered with reference to the electromagnetic force;

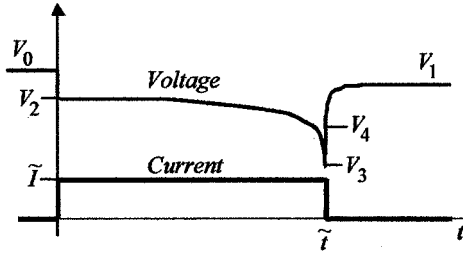


Fig. 4. Typical voltage and current profile for a constant-current discharge.

- \mathbf{p}_{rk} , \mathbf{p}_{ck} , and \mathbf{p}_{tk} are vectors containing the details of the particular battery considered with reference to the k th resistance and capacitance, respectively.

In the remainder of this paragraph reference is made to (6) instead of (5).

The identification is particularly simplified if the following conditions can be assumed.

- 1) Vectors \mathbf{p}_e , \mathbf{p}_{r0} are constituted by two elements each.
- 2) Vectors \mathbf{p}_{rk} , \mathbf{p}_{tk} with $k > 0$ are constituted by a single element.

Under these assumptions, (6) becomes

$$E = E(SOC, \theta, p_{e1}, p_{e2}) \quad R_0 = R_0(SOC, \theta, p_{r01}, p_{r02})$$

$$R_k = R_k(SOC, \theta, p_{rk1}) \quad T_k = T_k(SOC, \theta, p_{tk1}) \quad k > 0. (7)$$

in which the numbers at the left hand of the equal signs are to be experimentally evaluated by suitable tests.

A good test is, for instance, is the one pictorially represented in Fig. 4. This test, to be carried out in a thermostatic room, is to be prepared as follows.

- 1) First, the battery is fully charged.
- 2) Then, the battery is kept disconnected from any external circuit and the complete stabilization of the voltage is expected (this phase may last several hours).
- 3) The actual test is composed of measuring of the initial voltage V_0 (that can be assumed to be equal to the electromotive force corresponding to the condition of battery full and the actual electrolyte temperature).
- 4) Executing a constant-current discharge for a duration \tilde{t} .
- 5) Registering the subsequent transient up to the complete stabilization of voltage, so that the stabilized voltage V_1 can be equalled to the battery electromotive force.

The parameters of (7) can be determined as follows.

- p_{e1} and p_{e2} can be directly determined by measuring the voltage at the beginning and the end of the test (i.e., V_0 and V_1) under the assumptions that they are numerically equal to the e.m.f.s at the beginning and the end of the test (the relevant values of SOC_{beg} and SOC_{end} can be easily evaluated).
- p_{r01} and p_{r02} can be directly determined measuring the “instantaneous” voltage drop during the current fronts, which determine $R_{0\text{-beg}} = (V_0 - V_2)/\tilde{I}$, $R_{0\text{-end}} = (V_4 - V_3)/\tilde{I}$: they are simply obtained by solving the 2×2 al-

gebraic system¹:

$$\begin{cases} R_{0\text{-beg}} = R_0(SOC_{\text{beg}}, \theta_{\text{beg}}, p_{r01}, p_{r02}) \\ R_{0\text{-end}} = R_0(SOC_{\text{end}}, \theta_{\text{end}}, p_{r01}, p_{r02}). \end{cases}$$

- p_{tk1} , p_{tk2} , and p_{rk1} with $k > 0$ can be determined considering the voltage transient after $t = \tilde{t}$ and determining the set of parameters that causes the transient to be best fitted, e.g., minimizing, according to what is stated in Section II, some error measure such as the mean quadratic difference or the mean area difference. The maximum value of k must be chosen according to the considerations reported in Section VI. Therefore, the total drop $V_1 - V_4$ will be shared among the resistances R_k with $k > 0$. Depending on the order chosen for the model and on the fitting criterion, the value of V_4 , needed to calculate the parameters p_{r01} and p_{r02} related to R_0 , will be affected.

It is important to note that in the third order model formulation proposed in [11] the above-reported two conditions that enable the simplified parameter identification are met. In particular, the electrical parameter definition equations are

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad T_1 = T_{10} = \text{const}$$

in which, obviously, it can be assumed

$$p_{e1} = E_{m0} \quad p_{e2} = K_E$$

$$p_{r01} = R_{00} \quad p_{r02} = A_0$$

$$p_{r11} = R_{10} \quad p_{t11} = T_{10}.$$

If this formulation is assumed, estimating the electrolyte temperature of (7) is not an issue. In fact, in this case the temperature appears only in the e.m.f., and this equation is utilized with measures taken at the beginning of the discharge (when $V = V_0$) and at the end of the stabilization period (when $V = V_1$) so that the electrolyte temperature can be assumed to equal the room temperature.

C. Parameters Referring to the Parasitic Reaction Branch of the Electric Equivalent

The parasitic reaction current has been expressed as a function of the parasitic branch voltage V_{PN} and the electrolyte temperature θ

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0} + A_p \frac{1-\theta}{\theta_f}}\right).$$

The identification of the constants of this equation, i.e., G_{p0} , V_{p0} , A_p can be obtained by means of tests made when the battery is completely full, and relating the voltage and current at the battery pins and the temperature. In fact, when the battery is completely full it can be assumed that $I_m \approx 0$ (see Fig. 1), The electrolyte temperature can be estimated from the ambient temperature.

¹The electrolyte temperature can be measured directly in case of flooded batteries, or (if \tilde{t} is not too large) approximately assumed equal to the temperature of one of the battery pins in case of VRLA.

TABLE I
MANUFACTURER'S DATA FOR THE BATTERIES CONSIDERED IN THIS PAPER

Battery	C_1 [Ah]	C_3 [Ah]	$C_{10}=C_n$ [Ah]	θ_n [°C]	V_{eod} [V]	α [°C ⁻¹]
Battery1	221	366	500	20	1.80	0.0085
Battery2	227.5	357	540	25	1.80	0.01

However, several lab tests have shown [6] that it can be assumed, for $V_{pn} = 2.4$ V/element

$$I_p(30^\circ\text{C}) \approx 10I_p(20^\circ\text{C}).$$

D. Parameters Referring to the Battery Thermal Model

The proposed battery thermal model is a simple thermal capacitance–thermal resistance model. These two parameters can be derived experimentally or obtained from the manufacturer.

It must be noted however that, differently from all other parameters, the thermal resistance depends on the installation of the battery in the room. In particular, the relative position of the monoblocks (battery modules) within a battery pack is very important, since it strongly influences the surface in direct contact to the free air surrounding the battery pack.

Approximate estimates of the parameters can be obtained by means of the usual techniques for heat transfer problems, based on the battery mass, shape, case material, etc.

III. IDENTIFICATION OF MODEL PARAMETERS USING MANUFACTURER'S DATA

The techniques described in the previous paragraphs for identifying the battery model parameters require several lab tests to be performed.

Obviously, to make such tests some devices able to keep constant the current (e.g., by on-line changing the resistance of a resistor connected to the battery) and the temperature (thermostatic chamber) are needed. Therefore, these tests are costly and complex.

When it is not possible, for technical or economic reasons, to make these tests, an approximate estimate of some of these parameters can be determined with simple computations from the battery data supplied by the manufacturer.

The most readily usable data from the manufacturer are related to the battery capacity.

Normally constant-current discharge capacity at different currents and end-of-discharge voltages are supplied. In addition, the manufacturer often supplies some information on the dependence of the capacity on the temperature, often in terms of a “temperature coefficient” value $\alpha = (1/C)(\partial C/\partial\theta)$.

If, as often done by manufacturers, α is assumed constant, the following relation can be easily obtained² between ε and α

$$\varepsilon = \alpha(\theta_n - \theta_f). \quad (8)$$

The parameter C_{0^*} is then obtained by

$$C(I_n, \theta_n) = C_{0^*} \left(1 + \frac{\theta_n}{-\theta_f}\right)^\varepsilon$$

²It is sufficient to evaluate $\alpha = (\partial C/\partial\theta)/C$ using the formulation of $C(I, \theta)$ given by (4) and evaluate the resulting formula in the point (I_n, θ_n) .

TABLE II
PARAMETERS REFERRING TO CAPACITY FOR THE BATTERIES CONSIDERED IN THIS PAPER

Battery	θ_f [°C]	ε	δ	K_c	C_{0^*} [Ah]
Battery 1	-35	0.468	1.80	1.098	404.7
Battery 2	-35	0.600	1.01	1.723	390.7

and finally K_c and δ are obtained using values of capacity at currents I different from I_n

$$C(I, \theta_n)_{I, \theta = \text{const}} = \frac{K_c C_{0^*} \left(1 + \frac{\theta_n}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^\delta}.$$

If a larger number of experimental tests is available it is advisable to exploit all the data available and choose a set of parameters that minimizes the error between measured and computed capacities.

In some cases the manufacturer supplies data about the battery internal resistance. To exploit these data for the parameter identification of the proposed model it is important to know the adopted measuring technique. Two measures are relevant.

- Measure by means of the “instantaneous” voltage drop subsequent to a current step (i.e., something similar to $V_2 - V_0$ or $V_3 - V_4$ in the plot of Fig. 4). In this case, the measure is immediately useful to identify the parameters of R_0 .
- Measure made according to the IEC 896-1 and IEC 896-2 standards. In this case, the result of the measure is not immediately exploitable.

In some cases, however, the IEC resistance can be utilized by means of a trial-and-error simulation cycle:

- use a tentative set of resistance parameters;
- simulate the IEC procedure for measuring the internal resistance, read the IEC resistance on the simulation results;
- correct the tentative parameters;
- repeat the cycle until satisfactory results are obtained.

Since the proposed thermal model is the simplest dynamic model (linear, first order), when data is available, it is immediately exploitable. If no data is directly available, estimates of thermal capacitance can be drawn considering composition of the battery interior (plates, electrolyte). The internal resistance can be computed starting from information on the physical and geometric characteristics of the battery case.

The thermal time constant (thermal capacitance times thermal resistance) can be experimentally obtained as follows.

- The battery is kept in an oven at a constant temperature (e.g., 10 °C above the ambient temperature) up to the thermal equilibrium.

TABLE III
DATA OF THE DISCHARGE TESTS FOR THE ASSESSMENT OF THE PARAMETERS OF THE ELECTRIC COMPONENTS OF THE TWO BATTERIES (SEE FIG. 4)

Battery	$V_0[V]$	$V_1[V]$	$V_2[V]$	$V_3[V]$	$V_4[V]$	θ_{end}	$\tilde{I} [A]$	$\tilde{t} [h]$
Battery 1	2.165	1.965	2.06	1.790	1.890	26	58	8.494
Battery 2	2.115	1.995	2.01	1.788	1.905	26	63	7.197

TABLE IV
PARAMETERS REFERRING TO THE MAIN BRANCH OF THE ELECTRIC EQUIVALENT FOR THE BATTERIES CONSIDERED IN THIS PAPER

Battery	$E_{no} [V]$	$K_E [mV/^\circ C]$	$R_{oo} [m\Omega]$	A_0	$R_{i0} [m\Omega]$	$T_{i0} [s]$
Battery 1	2.165	0.782	1.810	-0.056	0.386	7200
Battery 2	2.115	0.832	1.667	0.236	0.647	7000

TABLE V
PARAMETERS REFERRING TO THE THERMAL MODEL FOR THE BATTERIES CONSIDERED IN THIS PAPER

Battery	Thermal capacitance [kJ/^\circ C]	Thermal resistance [^\circ C/W]
Battery 1	12	1.1
Battery 2	20	0.6

- Then it is put at the ambient temperature, and the evolution of the electrolyte temperature is registered.³
- Based on the registered temperature behavior a *best fit* time constant can be computed.

IV. EXAMPLES OF PARAMETER IDENTIFICATION

Some checks of the validity of the proposed battery model have already been presented in [11]. However, in that case, no indication was given on how the numerical parameters used in the model were computed.

Hereafter, on the contrary, the validity of the proposed model is experimentally verified in conjunction with the proposed techniques for identifying the model parameters.

The considered batteries are the same considered in [11], i.e.,
Battery 1: valve-regulated lead-acid (gelled), $C_{10} = 500$ Ah;
Battery 2: flooded lead-acid, $C_{10} = 540$ Ah.

A. Capacity Parameters

In Section III, a technique to derive some of the model parameters from manufacturer data, thus avoiding specific experimental test is proposed.

The manufacturer's data of interest for the batteries considered in this paper are reported in Table I, in which C_1 , C_3 , C_{10} are, respectively, the capacity at one, three, ten hour discharge, all measured at the temperature θ and considering the end-of-discharge voltage V_{eod} (Volts per element).

Normally the freezing temperature is in the range $(-30, -40)^\circ C$. Considering for both batteries a $\theta_f = -35^\circ C$ it is immediately obtained (8): $\varepsilon_1 = 0.468$, $\varepsilon_2 = 0.600$.

Capacity parameters have been calculated using the three capacity values given by the manufacturer ($C_1 = C(I_1, \theta_n)$, $C_3 = C(I_3, \theta_n)$, $C_{10} = C(I_{10}, \theta_n)$) and assessing a fourth value $C(I_{10}, \theta_n + \Delta\theta)$ starting from the knowledge of α . The results obtained are reported in Table II.

³Again, direct measure is possible for flooded batteries, estimates of the electrolyte temperatures are possible using the battery pin temperature.

As already noted, these parameters identified from manufacturer's data give only first information on the parameters valid for a given battery. Corrections are expected to be necessary and can be made once the whole set of parameters is identified, and simulations of some experimental test are made, according to what has been said in Section II.

B. Parameters of the Electric Components

As already noted, it is generally very difficult (or even impossible) to determine the parameters of the electric components starting from manufacturer's data. The process to be followed is therefore necessarily the one described in Section II. This process has been followed on the two batteries considered in this paper, and the results are shown in Tables III and IV.

C. Parameters Referring to the Battery Thermal Model

The parameters referring to the battery thermal model have been identified according to the technique suggested in Section II-D: the time constant with the oven test and the capacitance starting from the battery composition and the thermal capacitances of the different battery parts (plates, electrolyte, separator, etc). The results are reported in Table V.

D. Results

Using the above parameters some transients have been simulated for both the batteries.

Fig. 5 shows the matching obtained in the test performed for parameter identification according to the rules indicated in Section II-B.

On the other hand, Fig. 6 shows the results obtained by comparing simulation and lab measures using a completely different, highly informative, test case, consisting of a sequence of constant-current (C_8) discharges followed by rest periods in which the current is zero. While the results of Fig. 6 are, obviously, slightly less precise than those of Fig. 5, they are still good.

The interpolation set can be improved by repeated simulations and progressive modifications of some parameters. This however would require, in absence of a specialized, complex computer program, a human operator with knowledge of the mathematical structure of the equation parameters, while in this paper a more automated procedure has been chosen.

Work is in progress to produce a computer program to which sufficient skill is given so that the "repeated simulations and progressive modifications of some parameter" is automated.

V. SIMPLIFIED PARAMETER IDENTIFICATION

As it has been seen in Section IV, the number of the parameters of the considered battery model, and that in principle should be identified is very large. It has also been seen that only a small

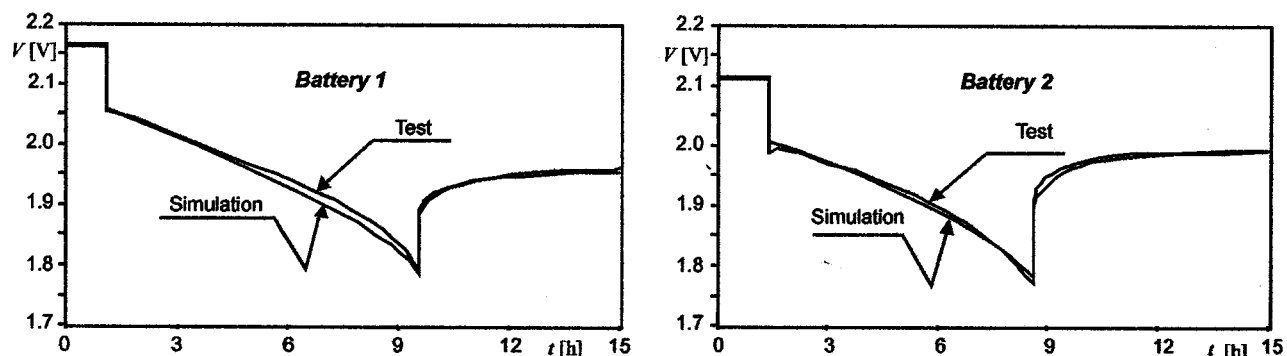


Fig. 5. Comparison between measured and simulated discharge transients for battery 1 and battery 2 (voltages versus time).

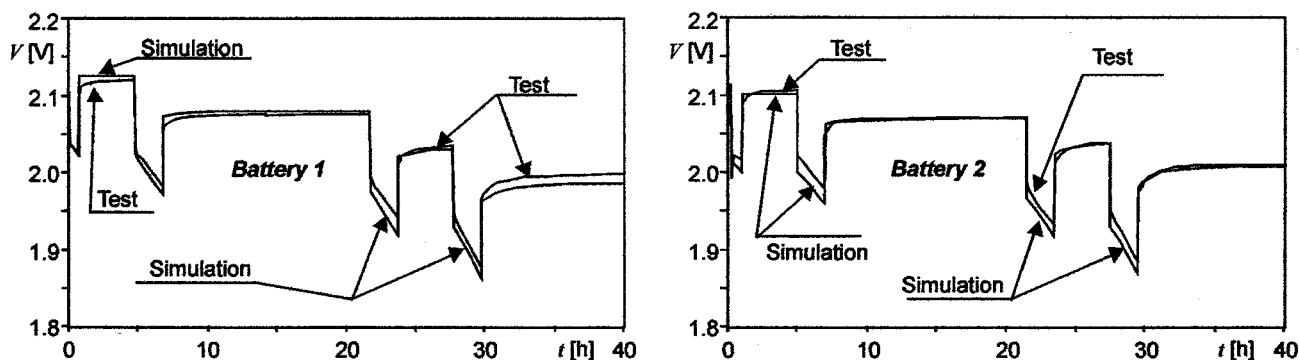


Fig. 6. Comparison between measured and simulated discharge transients for battery 1 and battery 2 (voltages versus time).

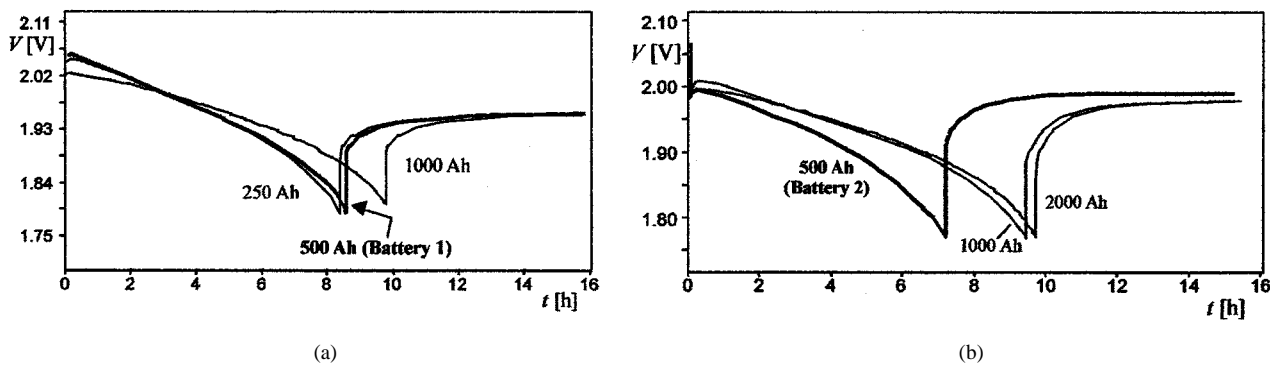


Fig. 7. Voltage response to a current step (of the type of Fig. 4) of different batteries of the same family. (a) Gelled VRLA of the same manufacturer and model. (b) Flooded of the same manufacturer and model.

part of them can be inferred from the usually published manufacturer's data.

This is an obstacle in the use of the model, although it is an almost automatic consequence of the complexity of the battery behavior.

An idea to reduce the complexity of the parameter identification is to try to exploit similar behavior of batteries having a similar construction.

In Fig. 7, the voltage responses to a current step (of the type of Fig. 4) of different batteries of the same family are shown. The numerical value of the current used is equal to the C_8 current (current that, according to the manufacturer's documentation, should discharge the batteries in eight hours).

It is easily seen that there exists a nonnegligible dispersion of behavior of different kinds of batteries. However, it looks

like all the voltage profiles shown in Fig. 7(a) and (b) can be simulated starting from the parameter interpolations of battery 1 and 2, and modifying only a very small number of parameters. In fact, making modifications only to parameters R_{00} , R_{10} , A_0 and C_{0^*} and making trivial modifications on the thermal model parameters the behaviors of Fig. 7 can be well matched. Just to give an example, Fig. 8 shows the matching of simulation and experimental data of 1000 Ah batteries using the modified parameters reported in Table VI.

The thermal model parameters have been varied according to these rules.

- The thermal capacitance is taken as proportional to the nominal battery energy ($E_n = C_n \times V_n$).
- The thermal resistance is taken as proportional to the battery module external surface.

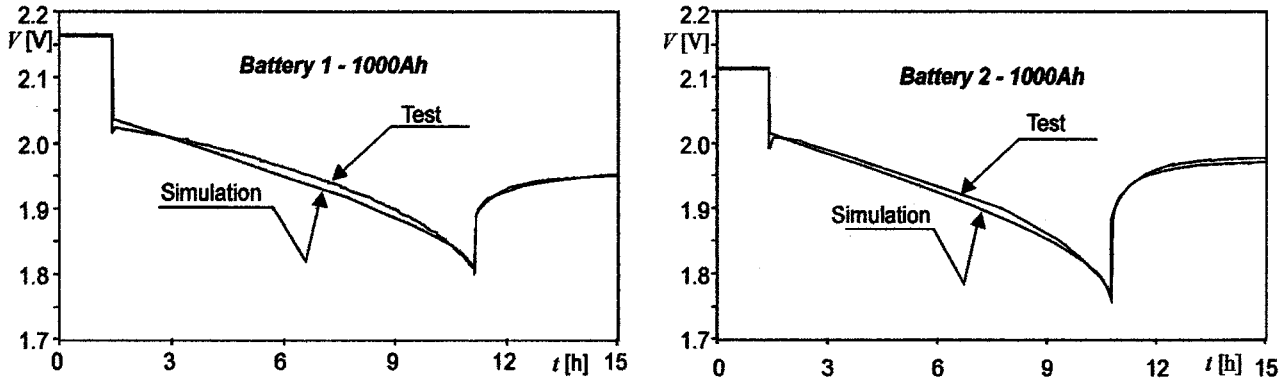


Fig. 8. Comparison of measures and simulations using simplified parameter interpolation (voltages versus time).

TABLE VI
PARAMETERS MODIFIED TO MAKE SIMULATIONS MATCHING EXPERIMENTAL RESULTS WITH MINIMUM IDENTIFICATION EFFORT

Battery Type	R_{00} [m Ω]	R_{10} [m Ω]	A_0	C_0^* [Ah]
gelled 500Ah (battery 1)	1.81	0.386	-0.056	404.7
gelled 1000 Ah	1.10	0.150	-0.40	898
flooded 500 Ah (battery 2)	1.67	0.647	0.236	390.7
flooded 1000 Ah	0.80	0.180	0.236	868

Therefore, the real number of parameters that has to be identified in practical cases is reduced.

VI. CHOICE OF THE TYPE OF MODEL FOR A PARTICULAR PURPOSE

The proposed battery models differ to each other by the number of $R-C$ blocks utilized (Fig. 1). The level of accuracy obtainable from different numbers of these blocks can be inferred considering the last part of the voltage transient reported in Fig. 4, i.e., the one after the time \tilde{t} .

Fig. 9(a) and (b) shows an example of such a transient as measured in a lab test, compared with the response of models having 1, 2, and 3 $R-C$ blocks. The values of $R_k - C_k$ used for simulations are computed so that the error, measured by a mean quadratic difference (2) is minimized.

The two figures show the same transient, but with different time scales.

It is clear from Fig. 9(a) and (b) that a generic repetition of the experimental behavior in the whole time range, the single exponential interpolation, corresponding to a single $R-C$ block can be acceptable, and the two exponential interpolation appears to be rather good. Also, the details of the voltage response, particularly difficult to follow especially in correspondence of current steps, shows that the three exponential interpolation (three $R-C$ blocks) could be the right choice.

Rather obvious, the more complex the battery model, the more difficult the parameter identification; in addition it must be noted that the repeatability of battery performance is limited; therefore a model that is able to reproduce a set of experimental results, with a high degree of precision, not necessarily will repeat the same performance when other tests are available.

Therefore it is felt that it is useless to consider models having more than three $R-C$ blocks.

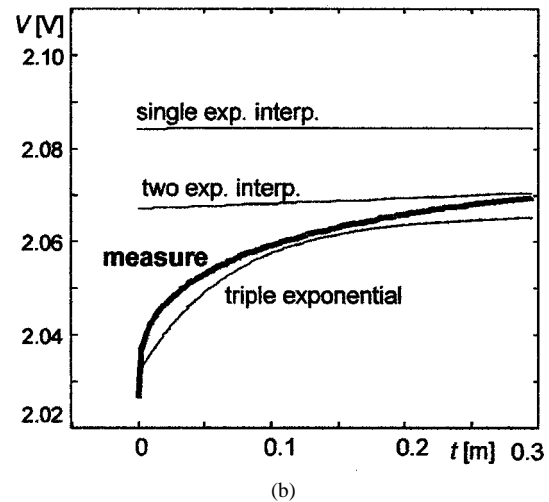
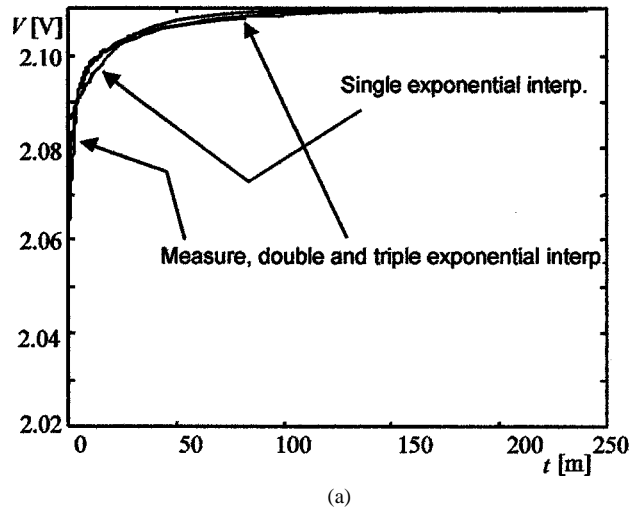


Fig. 9. Comparison of different degrees of precision of the different considered models (voltages versus time).

VII. CONCLUSION

- The electrical engineer needs reliable models of the electrochemical batteries, especially lead-acid batteries, to perform the task of system design and simulation. The recent increase in the use of batteries in power systems makes this need stronger.
- In this paper, the practical implications of the utilization of the models presented in [11] are discussed and practical

information on how to tackle them is supplied. In particular, some simplified ways to identify the model parameters with limited number of lab tests and limited computational effort have been proposed, that still offer a satisfying model accuracy.

- Although an accurate modeling of lead-acid batteries still remains a difficult task, this paper shows that the models proposed in [11], that are a family of models adapted to different levels of precision, give a useful contribution to simplify this task; in particular the third-order formulation, while offering accurate results, is still manageable in terms of computation and parameter identification efforts.

APPENDIX

EQUATIONS DEFINING THE MODEL PARAMETERS

Battery Capacity as a function of the discharge current I and electrolyte temperature θ

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_{0^*} \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^\delta}$$

($K_c, C_{0^*}, \varepsilon, \delta, I^*, \theta_f$ are constant parameters).

State-Of-Charge: $SOC = 1 - Q_e/C(0, \theta)$.

Depth-Of-Charge: $DOC = 1 - Q_e/C(I_{avg}, \theta)$ (I_{avg} is the average discharge current).

And, for the third-order formulation

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC).$$

Note: Needless to say, $273 + \theta$ indicates the electrolyte temperature measured in Kelvin (K).

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp\left(\frac{A_{22}I_m}{I^*}\right)}$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}$$

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0} + A_p \left(\frac{1-\theta}{\theta_f}\right)}\right)$$

where $E_{m0}, K_E, R_{00}, A_0, R_{10}, R_{20}, A_{21}, A_{22}, \tau_1, G_{p0}, V_{p0}, A_p, \theta_f$ are constant parameters.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank F. Buonsignori for his continuous effort and his intelligent contribution to all the lab tests on which this paper is based.

REFERENCES

- [1] M. Shepard, "Design of primary and secondary cells, an equation describing battery discharge," *J. Electrochem. Soc.*, July 1965.
- [2] K. J. Vetter, *Electrochemical Kinetics*. New York: Academic, 1967.
- [3] H. Bode, *Lead-Acid Batteries*. New York: Wiley, 1977.
- [4] L. Gopikanth and S. Sathyanarana, "Impedance parameters and the state-of-charge," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 9, pp. 369-379, 1979.
- [5] G. Smith, *Storage Batteries*. London, U.K.: Pitman, 1980.
- [6] R. Giglioli, P. Pelacchi, V. Scarioni, A. Buonarota, and P. Menga, "Battery model of charge and discharge processes for optimum design and management of electrical storage systems," in *Proc. 33rd Int. Power Source Symp.*, Cherry Hill, NJ, June 1988.
- [7] H. P. Schoner, "Electrical behavior of lead/acid batteries during charge, overcharge, and open circuit," in *Proc. 9th Electric Vehicle Symp. (EVS-9)*, 1988, Paper N.063.
- [8] R. Giglioli, A. Buonarota, P. Menga, and M. Ceraolo, "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery," in *Proc. 10th Int. Elect. Vehicle Symp.*, Hong Kong, China, Dec. 1990.
- [9] G. Casavola, M. Ceraolo, M. Conte, G. Giglioli, S. Granella, and G. Pede, "State-of-charge estimation for improving management of electric vehicle lead-acid batteries during charge and discharge," in *Proc. 13th Int. Elect. Vehicle Symp.*, Osaka, Japan, Oct. 1996.
- [10] M. Ceraolo, D. Prattichizzo, P. Romano, and F. Smargrasso, "Experiences on residual-range estimation of electric vehicles powered by lead-acid batteries," in *Proc. 15th Int. Elect. Vehicle Symp.*, Brussels, Belgium, Sept./Oct. 29-3, 1998.
- [11] M. Ceraolo, "Dynamical models of lead-acid batteries," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 1184-1190, Nov. 2000.



Stefano Barsali was born in Pisa, Italy, in 1969. He received the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Pisa, Pisa, Italy, in 1994 and 1998, respectively.

Currently, he is a Researcher in the field of electric power systems at the University of Pisa. His major fields of interest are electricity market liberalization, dynamic simulation of power systems, distributed generation, and storage batteries.



Massimo Ceraolo was born in Castrovillari, Italy, in 1960. He received the M.S. degree in electrotechnical engineering from the University of Pisa, Pisa, Italy, in 1995.

Since 1992, he has been working at the University of Pisa as a Researcher and then as an Associate Professor in electric power systems. His major fields of interest include active and reactive compensation of power systems, long-distance transmission systems, computer simulations in power systems, and storage batteries.

Anexo IV

Instrucciones de uso

Baterías de plomo aisladas de instalación fija

OPzS, UPS y OGi



Montaje y marcado CE por fecha.....
Puesta en servicio por fecha.....

Número de elementos/bloques:

Tipo:

Advertencias



Lea atentamente las instrucciones de uso y déjelas cerca de la batería en un lugar visible. Trabaje con las baterías únicamente cuando haya sido instruído por personal cualificado.



Cuando trabaje con las baterías, lleve gafas y ropa de protección. Siga las instrucciones para la prevención de accidentes, así como la DIN VDE 0510, VDE 0105, Parte 1.



Prohibido fumar
No exponga la batería a fuego, llamas ni chispas. ¡Peligro de incendio y explosión!



Lave y aclare con abundante agua cualquier salpicadura de ácido en los ojos o en la piel y acuda a un médico inmediatamente. Lave con agua la ropa manchada de ácido.



Evite cortocircuitos ¡Peligro de incendio y explosión!
¡Atención! Las piezas de metal de las baterías están siempre bajo tensión. ¡No deposite en ellas ningún objeto o herramienta extraños!



El electrólito (ácido sulfúrico diluido) es muy corrosivo



Los bloques de baterías o elementos son muy pesados
Utilice emplazamiento seguro
Utilice únicamente sistemas de transporte adecuados



¡Tensión eléctrica peligrosa!



La garantía será anulada en caso de ignorar las instrucciones de uso, no utilizar repuestos originales en reparaciones, en usos ajenos a los prescritos, en caso de añadir sustancias al electrólito o de hacer un uso arbitrario de las baterías.



Las baterías usadas que llevan este símbolo son reutilizables y deben ser devueltas al proceso de reciclaje, o bien proceder con ellas de acuerdo a las leyes vigentes en cada país.

1. Puesta en marcha de las baterías (cargadas y vacías)

Antes de poner en marcha los bloques o elementos, compruebe que el estado mecánico es correcto. Disponga cada bloque de baterías de acuerdo con su polaridad. Si es necesario, limpie las superficies de los bornes y los conectores. Apriete los conectores

con el tornillo de polo M10 con un momento de torsión de 22 Nm. Siga las instrucciones de montaje de TAB.

Examine el nivel del electrólito de cada elemento. Compruebe el nivel del electrólito, rellene los elementos que hagan falta con agua destilada, según la DIN 43 530, Parte 4. Tenga en cuenta que durante la primera

carga el volumen del electrólito asciende.

Conecte la batería correctamente polarizada al suministro de corriente continua con el cargador desconectado, los fusibles de la batería retirados y los consumidores separados: polo positivo de la batería en el conector positivo del cargador.

Conecte el cargador y siga el proceso de carga del apartado 2.2. Vigile la primera carga, para que no excedan los valores límite o se sobrepase la temperatura permitida. Una vez finalizada, desconecte el cargador o cambie el servicio según el apartado 2.3

2. Servicio

Para el montaje y operaciones a realizar en los sistemas de las baterías estacionarias lea la DIN VDE0510, Partes 1 y 2.

2.1. Descarga

Las capacidades, corrientes y tensiones durante la descarga están explicadas en el apartado 6. La batería no puede ser descargada por debajo de la tensión final de descarga específica. No descargue más que la capacidad descrita. Después de cada descarga, incluso de descargas parciales, la batería debe recargarse inmediatamente.

2.2. Carga

Para cargar, sólo se puede utilizar corriente continua. Los cargadores pueden ser, según la DIN 41 773: tipo IU según la DIN 41 774: tipo W según la DIN 41 776: tipo I

No sobrepase los límites de la corriente de carga y corrientes alternas superpuestas, detallados en el apartado 2.6

Procedimiento de carga para la puesta en marcha de las baterías llenas y cargadas:

- Tipo IU con tensión aumentada de 2,33 – 2,40 V por elemento y cambio automático a la tensión de carga de flotación (ver apartado 2.3 a) (Sistema paralelo de abastecimiento con nivel de recarga)
- Tipos W o tipo I: la tensión de carga aumenta (2,60 hasta 2,75 V) por número de elementos. Por ello, normalmente hay que desconectar los consumidores antes. Consulte los límites de corriente en el apartado 2.6. La carga dura entre 6 y 8 horas. Vigile el proceso de carga y, una vez terminado, desconecte o cambie a la tensión de carga de flotación.
- Tipo IU con tensión de carga de flotación (ver apartado 2.3 a). Después de una semana, está disponible como mínimo el 95% de la capacidad

La carga completa se produce cuando la tensión de los elementos y la densidad del electrólito dejan de ascender durante un periodo de 2 horas.

2.3 Sistema del funcionamiento en paralelo / Servicio de tampón

En este caso, los consumidores, la corriente continua y las baterías están conectados continuamente en paralelo. Así, la tensión de carga es al mismo tiempo la tensión de régimen de la batería y la tensión del equipo.

- En el **sistema de funcionamiento conmutado**, la fuente de corriente continua es capaz de suministrar en todo momento la corriente máxima de consumo, así como la corriente de la batería. La tensión de carga en flotación asciende a 20°C en los modelos OPzS y OGi (2,23 V por elemento) +/- 1% y en los modelos OPzL y UPS (2,25 V por elemento) +/- 1%
- En el **servicio de tampón**, la corriente del consumidor sobrepasa temporalmente la corriente nominal de la fuente de corriente continua. Durante ese tiempo, la batería suministra corriente, y por lo tanto no está siempre completamente cargada. Dependiendo de la carga, la tensión de carga debería ascender (2,25 hasta 2,30 V) por elemento.

2.4 Recarga

Después de una descarga, la batería se puede cargar con la tensión de carga de flotación (ver apartado 2.3 a). Para acelerar el tiempo de carga, la recarga se puede efectuar según describe el apartado 2.2 punto a). No obstante, los tiempos de recarga dependen del procedimiento de carga elegido y de la corriente de carga inicial. En general, el proceso dura de 12 a 24 horas con corrientes de carga de $2 \cdot I_{10} - 0,5 \cdot I_{10}$

2.5 Carga de igualación

Después de descargas profundas o de recargas incompletas, es necesario realizar cargas de igualación. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- con una tensión aumentada de 2,33 hasta 2,40 V por elemento hasta un máximo de 72 horas
- con las corrientes correspondientes a los tipos I y W (ver apartado 2.6): ya que en este caso se puede sobrepasar el límite permitido de tensión del consumidor, éste debe desconectarse.

Si se sobrepasa la temperatura máxima de 55 °C, hay que interrumpir el proceso de carga de igualación, continuar con la corriente disminuida o conectarse temporalmente a la carga de flotación. La carga de igualación se habrá completado cuando la densidad del electrolito y la tensión de cada elemento deja de ascender durante un periodo de 2 horas.

2.6 Corrientes de carga

No hay límite para las corrientes de carga en tanto permanezcan por debajo de la tensión de gaseamiento de 2,40 V por número de elemento. Para otros valores, hay que tener en cuenta los siguientes límites:

Límites de las corrientes de carga por encima de la tensión de gas de 2,40 V/elemento por 100 Ah₁₀

Procedimiento de carga	Corriente de carga	Tensión de los elementos
Tipo – I	5,0 A	2,60 – 2,75 V/elemento
Tipo – W	7,0 A 3,5 A	a 2,40 V/elemento a 2,65 V/elemento

Durante la carga hasta 2,40 V, el valor efectivo de la corriente alterna superpuesta puede ascender hasta una capacidad nominal de 20 A/100 Ah. Tras la recarga, en el funcionamiento en paralelo y en el funcionamiento tampón, el valor efectivo de la corriente alterna superpuesta no puede sobrepasar la capacidad nominal de 5 A/100 Ah.

2.7 Temperatura de la batería

Los datos técnicos consideran una temperatura nominal de 20 °C. La temperatura ideal de servicio asciende a 20 °C +/- 5 K. No obstante, valores entre 10 °C y 30 °C se consideran normales. Temperaturas más elevadas disminuyen la vida de la batería, mientras que temperaturas inferiores limitan su capacidad. No está permitido sobrepasar la temperatura límite de 55 °C.

2.8 Variación de las tensiones de carga en función de la temperatura

No es necesario ajustar la tensión de carga de flotación en función de la temperatura, siempre que las temperaturas medias oscilen entre 10 °C y 30 °C. En caso de que las temperaturas mensuales medias estén por debajo de 10 °C, y para acortar el tiempo de carga, hay que aumentar la tensión de carga (-0,005 V/K por número de elemento). Si las temperaturas mensuales medias están por encima de los 30 °C, y para reducir la corrosión y el consumo de agua, la tensión de carga se puede reducir (-0,004 V/K por número de elementos).

2.9 Electrolito

El electrolito es ácido sulfúrico diluido. Si la batería está cargada, los valores nominales son de 20 °C, mientras que en posición "max" tiene una tolerancia máxima de +/-0,01 kg/l.

Temperaturas superiores reducen la densidad del ácido, mientras que temperaturas inferiores los aumentan. El factor corrector de los niveles está en -0,0007 kg/l por K

Ejemplos:

Niveles de electrolito de 1,23 kg/l a 35 °C corresponden a 1,24 kg/l a 20 °C

Niveles de electrolito de 1,247 kg/l a 10 °C corresponden a 1,24 kg/l a 20 °C

2.10 Uso cíclico (sistema fotovoltaico)

Limite las descargas a un nivel máximo del 80 %. En el transcurso de 1 a 4 semanas máximo, los elementos vuelven a estar cargadas al 100%. En descargas cíclicas de 0,2 x C10, hay que utilizar una tensión de carga de entre 2,30 V y 2,35 V/elemento. En descargas cíclicas de 0,2 hasta 0,3 x C10, la tensión de carga deberá oscilar entre 2,35 V y 2,40 V/elemento. En descargas diarias de más de 0,3 x C10, se produce una estratificación perjudicial del electrolito. Para evitarlo, hay que realizar cargas de gaseamiento una vez por semana como mínimo, o bien instalar elementos TAB OPzS EU (con removimiento electrolito).

3. Mantenimiento de la batería

Para evitar corrientes de fuga con el consiguiente peligro de incendio, mantenga las baterías limpias y secas. Las baterías sólo pueden limpiarse con agua, sin utilizar detergentes ni disolventes. Evite las cargas electrostáticas. Cuando el electrolito está en el nivel "Min", hay que rellenar hasta el nivel "Max". Utilice agua dest. para rellenar, según la DIN 43 530, Parte 4 (conductibilidad máxima: 30 uS/cm).

Cada 6 meses, realice las siguientes comprobaciones y lecturas:

- Tensión de la batería
- Tensión de algunos bloques de elemento (elemento piloto)
- Temperatura del electrolito de los bloques de los elementos (elementos piloto), cada 12 meses:
- Medición y registro de las tensiones y temperaturas de cada bloque/elemento
- Examen de conectores, dispositivos y sistema de ventilación.

4. Inspecciones

Realice las inspecciones de acuerdo con la DIN 43 539, Partes 1 y 4, y el IEC 896 – 1.

En el caso de inspecciones especiales, como por ejemplo para obtener el certificado de seguridad, proceda según la DIN VDE 0107 y la DIN VDE 0108.

5. Situación fuera de servicio y almacenamiento

Si las baterías de plomo van a estar fuera de servicio durante un largo periodo de tiempo, almacénelas totalmente cargadas en un lugar seco y sin riesgo de heladas. Para evitar daños, realice cargas de igualación cada 6 semanas, o bien una carga continua de flotación.

6. Transporte

Las baterías de elementos TAB están protegidas frente a cortocircuitos. No se consideran mercancía peligrosa (ADR) por carretera o ferrocarril, de acuerdo con la GGVS (Gefahrgutverordnung Strasse), la GGVE (Gefahrgutverordnung Eisenbahn) y la ADR, siempre que no estén dañadas, estén protegidas contra daños, desprendimientos y golpes y se encuentren debidamente paletizadas (anexo A, capítulo 3.3, disposición especial 598). Ninguna pieza de envío debe contener por fuera restos de ácido peligrosos.

Las baterías se consideran mercancía peligrosa en transportes por mar y aire. Por lo tanto, deben ser empaquetadas y declaradas de acuerdo al código IMDG o al IATA-DGR.

En general, las baterías de elementos que no contiene electrolito no se consideran mercancía peligrosa en ningún tipo de transporte.

Datos técnicos

TAB OPzS

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,85 V	C5 (Ah) 1,83 V	C3 (Ah) 1,82 V	C1 (Ah) 1,79 V
2 OPzS 100	103	206	375	13,7	151	100	85	75	52
3 OPzS 150	103	206	375	16,0	226	150	126	113	78
4 OPzS 200	103	206	375	18,0	301	200	170	150	104
5 OPzS 250	124	206	375	22,0	376	250	215	189	130
6 OPzS 300	145	206	375	26,0	452	300	255	225	156

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,83 V	C5 (Ah) 1,81 V	C3 (Ah) 1,79 V	C1 (Ah) 1,74V
5 OPzS 350	124	206	491	29,0	527	350	300	264	180
6 OPzS 420	145	206	491	34,0	632	420	360	315	216
7 OPzS 490	166	206	491	39,0	737	490	425	369	252

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,83 V	C5 (Ah) 1,81 V	C3 (Ah) 1,79 V	C1 (Ah) 1,73V
6 OPzS 600	145	206	666	50,0	903	600	510	450	324
8 OPzS 800	191	210	666	65,0	1204	800	690	600	432
10 OPzS 1000	233	210	666	80,0	1510	1000	865	750	540
12 OPzS 1200	275	210	666	93,0	1810	1200	1040	900	648

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,83 V	C5 (Ah) 1,81 V	C3 (Ah) 1,79 V	C1 (Ah) 1,70V
12 OPzS 1500	275	210	821	119,0	2260	1500	1275	1125	780
16 OPzS 2000	397	212	797	160,0	3010	2000	1700	1500	1040
20 OPzS 2500	487	212	797	200,0	3760	2500	2125	1875	1300
24 OPzS 3000	576	212	797	240,0	4520	3000	2550	2250	1560

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,80 V	C5 (Ah) 1,78V	C3 (Ah) 1,77 V	C1 (Ah) 1,71V
12V 1 OPzS 50	272	205	388	36,6	73	60	45	39	29
12V 2 OPzS 100	272	205	388	53,3	146	105	90	78	58
12V 3 OPzS 150	380	205	388	76,2	218	158	135	117	87
12V 4 OPzS 200	272	205	388	48,5	291	210	180	156	116
12V 5 OPzS 250	380	205	388	65,3	364	263	225	195	145
12V 6 OPzS 300	380	205	388	72,8	437	315	270	234	174

TAB OGi BLOCK

Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C10 (Ah) 1,80 V	C5 (Ah) 1,75 V	C3 (Ah) 1,75 V	C1 (Ah) 1,70 V	C1/2 (Ah) 1,65 V	C1/6 (Ah) 1,65 V	C1/12 (Ah) 1,60 V
12 V 1 OGi 25	272	205	375	33	29,0	25,5	22,5	16,8	114,3	9,2	6,7
12 V 2 OGi 50	272	205	375	41	55,0	49,5	44,7	32,8	28,0	18,0	13,1
12 V 3 OGi 75	272	205	375	49	80,0	74,5	67,5	49,6	42,2	27,3	19,8
12 V 4 OGi 100	272	205	375	58	105,0	98,5	89,4	65,7	56,1	36,1	26,1
12 V 5 OGi 125	380	205	375	78	135,0	123,0	111,3	81,6	69,0	44,3	31,7
12 V 6 OGi 150	380	205	375	86	165,0	148,5	133,8	98,2	82,5	52,7	37,1
6 V 7 OGi 175	272	205	375	49	193,0	172,5	156,0	114,1	94,0	58,7	40,8
6 V 8 OGi 200	272	205	375	53	228,0	197,5	178,8	130,0	108,0	67,3	46,8
6 V 9 OGi 225	380	205	375	68	254,0	221,5	200,7	145,8	121,5	75,5	52,6
6 V 10 OGi 250	380	205	375	72	270,0	247,0	223,5	161,7	133,0	80,5	55,3
6 V 11 OGi 275	380	205	375	75	304,0	271,0	245,1	177,6	146,0	88,5	60,7
6 V 12 OGi 300	380	205	375	79	320,0	296,0	268,2	194,4	159,5	96,5	66,3
2 V 24 OGi 600	205	272	375	53	684,0	592,5	536,4	390,0	324,0	201,9	140,4
2 V 30 OGi 750	205	380	375	72	810,0	741,0	670,5	485,1	399,0	241,5	165,9
2 V 36 OGi 900	205	380	375	79	960,0	888,0	804,6	583,2	478,5	289,5	198,9

PROYECTO FIN DE CARRERA



MODELADO Y ENSAYO DE BATERIAS: VALIDACION DE SIMULACIONES DE CARGA Y DESCARGA

Índice

1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Introducción

- Las baterías siempre han sido de gran utilidad en la industria.
- Hay diferentes tipos según su uso, en este PFC estudiaremos las baterías de plomo-Ácido.



Banco de baterías industrial

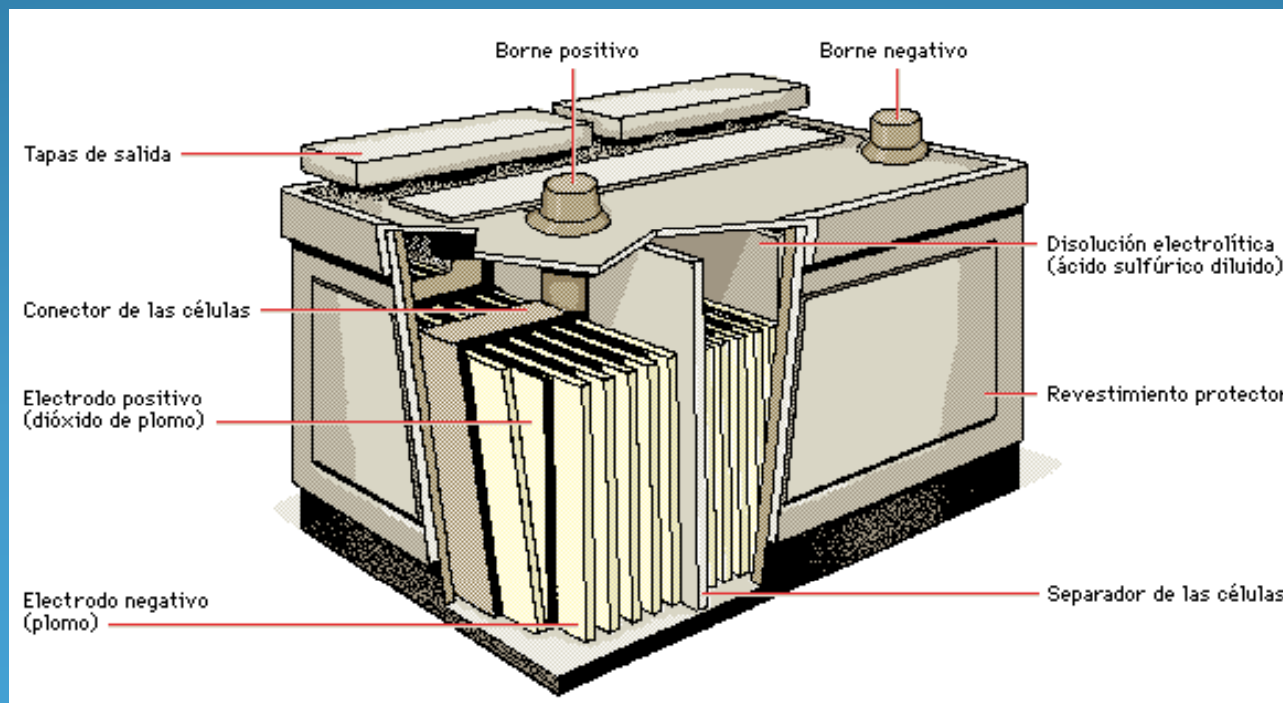


Batería de automóvil



Baterías de móviles

- Con las baterías podemos disponer de la energía cuando queramos.
- Son difíciles de modelar con exactitud.
- En este PFC se proponen dos modelos sencillos, que cometen un error aceptable.
- Estas son las piezas más importantes de una batería.



Índice

1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Modelos de baterías propuestos

➤ Este proyecto basa su estudio en dos modelos propuestos por:

-Giglioli, Buonarota , Menga y Ceraolo (4^{to} orden)

-Massimo Ceraolo y Stefano Barsali (3^{er} orden)

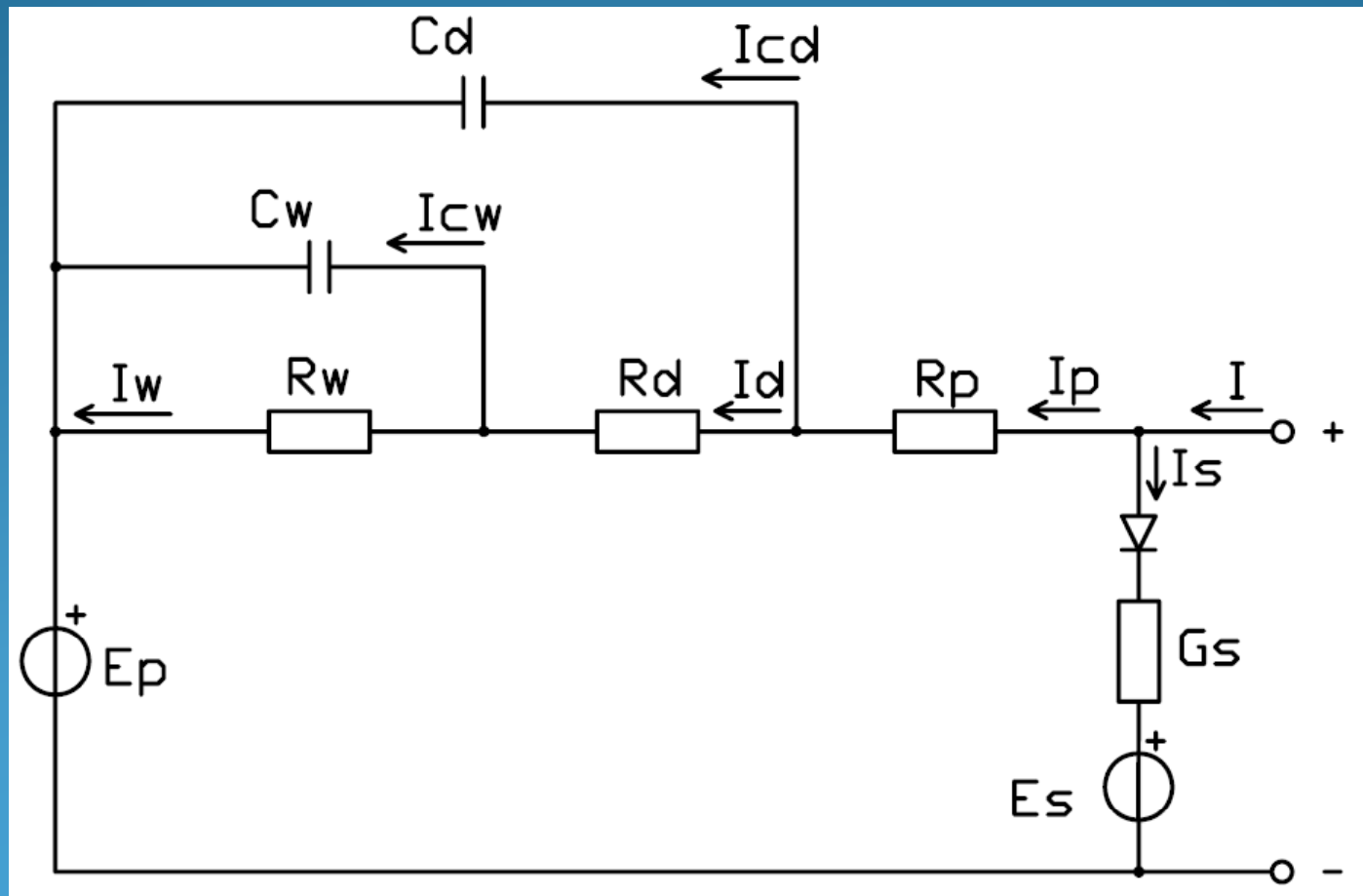
➤ Los modelos fueron presentados en artículos de publicaciones científicas.

➤ El primero de ellos en el año 1990 (4^{to} orden), el otro (3^{er} orden) en el año 2000 y 2002.

➤ En ambos modelos se hace una analogía eléctrica de los fenómenos internos de la batería.

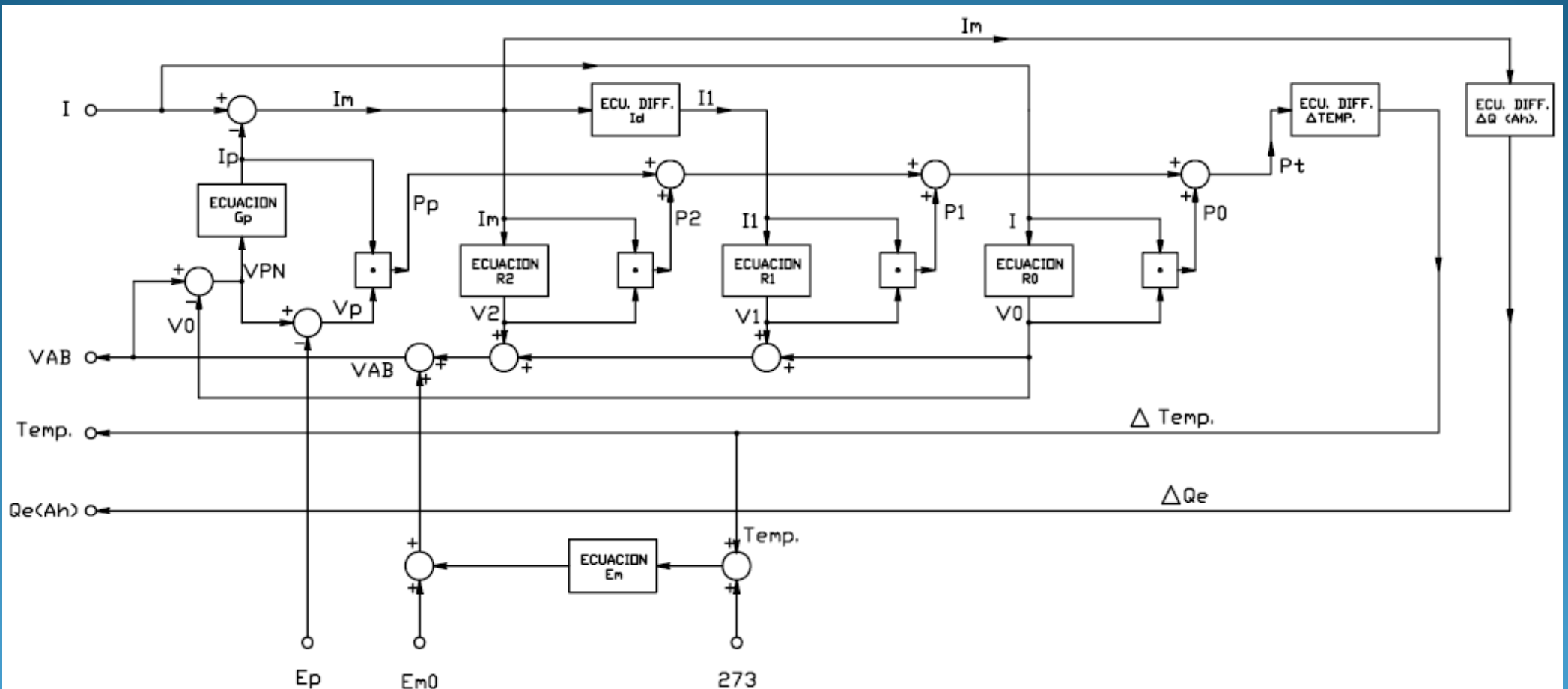
Modelo de 4^{to} orden

➤ Circuito eléctrico del modelo:



Modelo de 4^{to} orden

➤ Diagrama de Bloques del Modelo:



Modelo de 4^{to} orden

➤ Ecuaciones algebraicas del Modelo:

$$E_p = E_{p0} - K_e(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_p = R_{p0}(1 - \beta\theta) - R_c \ln(SOC)$$

$$R_d = R_{d0} \{ A_{d1} / (1 - SOC) + \exp[A_{d2}(1 - SOC)] \} [1 + \exp|A_{d3}I_d/I^*|]^{-1}$$

$$R_w = -R_c \ln[1 - (1 - SOC)/SOC(K_c - 1)|I_w/I^*|^\delta]$$

$$G_s = G_{s0} \exp[A_{sv}V_{AB} + A_{s\theta}(\theta - \theta_f)] / V_{AB}$$

$$V_{ab} - I_p \cdot R_p - I_d \cdot R_d - I_w \cdot R_w - E_p = 0$$

$$P_1 - I_p^2 \cdot R_p - I_d^2 \cdot R_d - I_w^2 \cdot R_w - I_s(V_{AB} - E_s) = 0$$

$$I_s - G_s V_{AB} = 0$$

$$I - I_p - I_s = 0$$

$$\theta - \theta_a - \Delta\theta = 0$$

Modelo de 4^{to} orden

➤ Ecuaciones diferenciales y calculo de parámetros de la batería:

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{\tau_d} (I_p - I_d) \quad \frac{dI_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (I_d - I_w)$$

$$\frac{dQ_0}{dt} = -I_p \quad \frac{d\Delta\theta}{dt} = \frac{1}{\tau_\theta} [P_1 R - \Delta\theta]$$

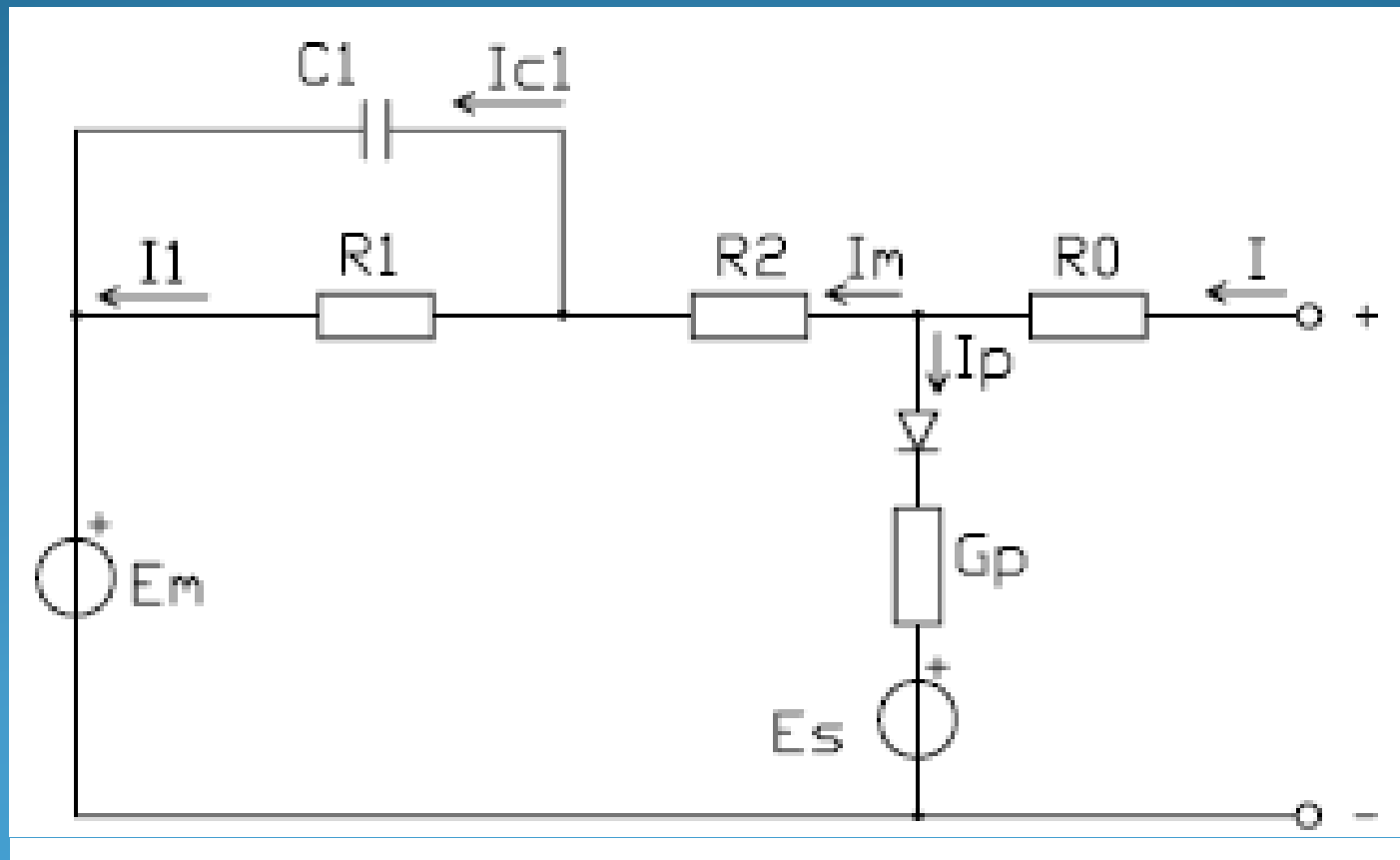
$$C^*(\theta) = T_n I^*(\theta) = C_0 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^\varepsilon \quad \frac{C_0(I, \theta)}{C^*(\theta)} = \frac{K_c}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

$$C_0(I, \theta) = C_0 \frac{K_c \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

$$SOC = 1 - Q / (K_c C^*(\theta)) \quad DOC = 1 - Q / C(I_m, \theta)$$

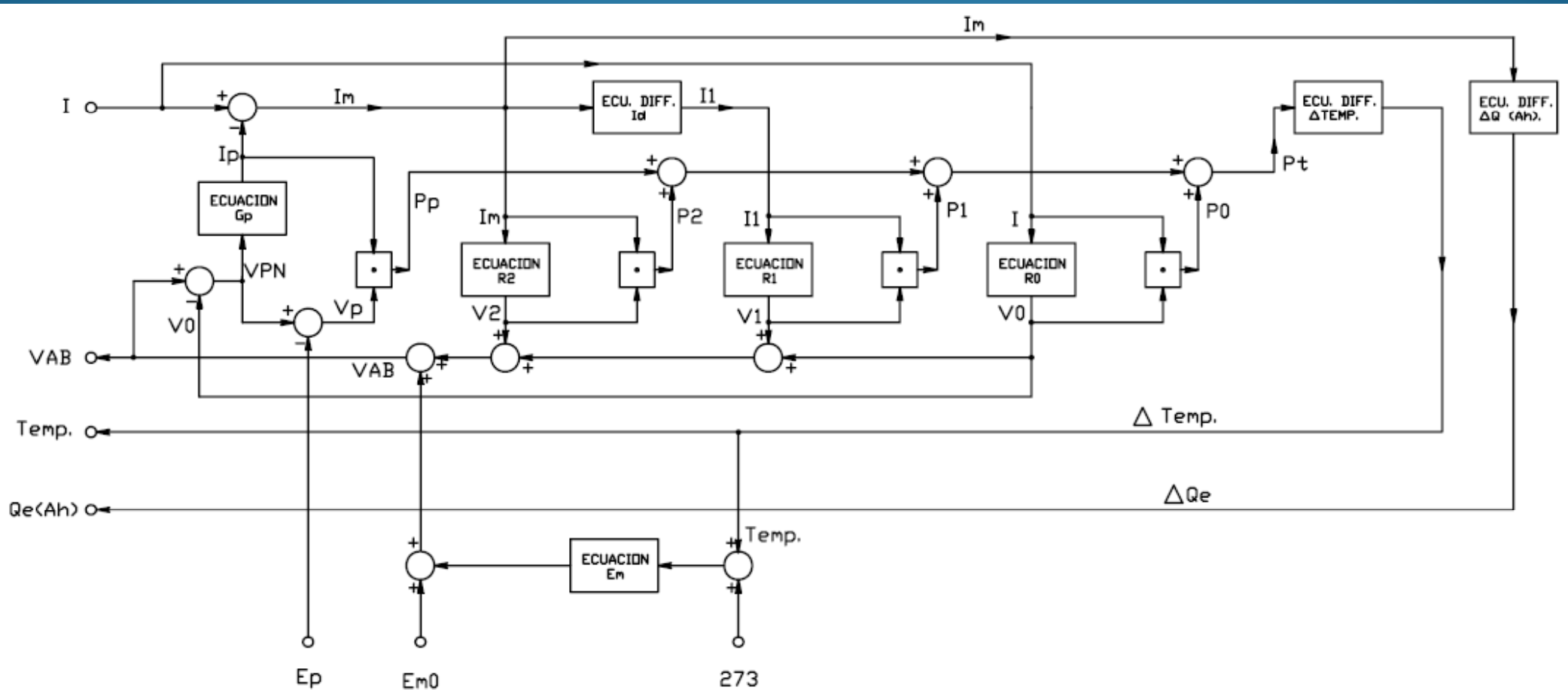
Modelo de 3^{er} orden

➤ Circuito eléctrico del modelo:



Modelo de 3^{er} orden

➤ Diagrama de Bloques del Modelo:



Modelo de 3^{er} orden

➤ Ecuaciones algebraicas del Modelo:

$$E_m = E_{m0} - K_e(273 + \theta)(1 - SOC)$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)]$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21}(1 - SOC))}{1 + \exp(A_{22} \frac{I_m}{I^*})}$$

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

$$I_p = G_p V_{PN} \quad G_p = G_{p0} \exp(V_{PN}/V_{p0} + A_p(1 - \theta/\theta_f))$$

$$V_{ab} = E_m + I_m \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 + I \cdot R_0$$

$$P_t = I_1^2 \cdot R_1 + I_m^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_0 + I_p(V_{pn} - E_p)$$

$$I = I_m + I_p$$

$$V_{pn} = V_{ab} - I \cdot R_0$$

Modelo de 3^{er} orden

➤ Ecuaciones diferenciales y calculo de parámetros de la batería:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (I_m - I_1) \quad \frac{dQ_e}{dt} = -I_m$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{C_\theta} \left[P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right]$$

$$C(I, \theta)_{I, \theta = const} = C_0(I) \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon \quad (\theta > \theta_f) \quad C_0(I) = \frac{K_c C_{0*}}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

$$C_0(I, \theta) = \frac{K_c C_{0*} \left(1 + \frac{\theta}{-\theta_f} \right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta}$$

$$SOC = 1 - Q_e / C(0, \theta) = 1 - Q_e / (K_c C(I^*))$$

$$DOC = 1 - Q_e / C(I_{avg}, \theta)$$

Índice

1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Ensayos realizados con la batería

➤ Para los ensayos hemos utilizado:

-Batería de el proyecto



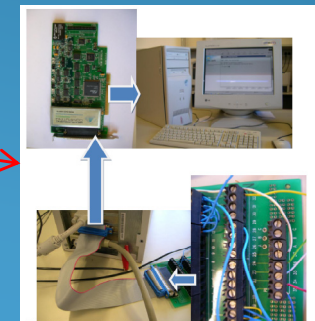
-Carga electrónica programable



-Dispositivo de desconexión automática



-Tarjeta de adquisición de datos



-Fuente de tensión regulable



-Multímetro

Ensayos realizados con la batería

- Nos hemos basado en la hoja de características para decidir las intensidades de descarga.

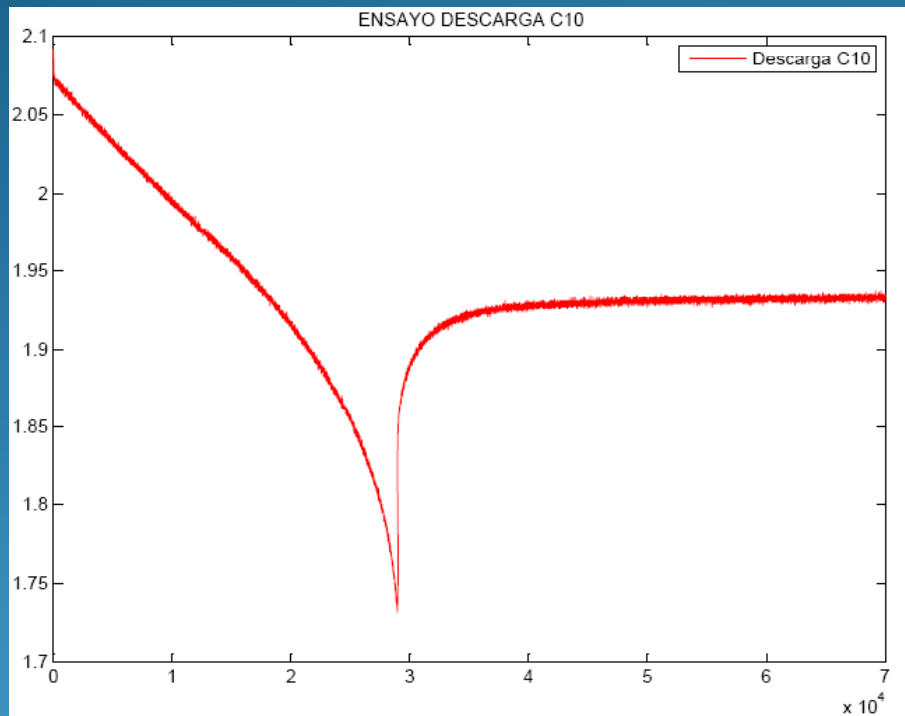
Tensión final de descarga	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Peso (kg)	C100 (Ah) 1,85 V	C10 (Ah) 1,80 V	C5 (Ah) 1,78V	C3 (Ah) 1,77 V	C1 (Ah) 1,71V
12V 1 OPzS 50	272	205	388	36,6	73	60	45	39	29
12V 2 OPzS 100	272	205	388	53,3	146	105	90	78	58
12V 3 OPzS 150	380	205	388	76,2	218	158	135	117	87
12V 4 OPzS 200	272	205	388	48,5	291	210	180	156	116
12V 5 OPzS 250	380	205	388	65,3	364	263	225	195	145
12V 6 OPzS 300	380	205	388	72,8	437	315	270	234	174

- Hemos reproducido las descargas C100, C10, C5, C3 y C1.
- Además se han hecho dos descargas adicionales, una de 10 A y la otra de 20 A.
- Los ensayos de carga no los pudimos realizar a intensidad constante.

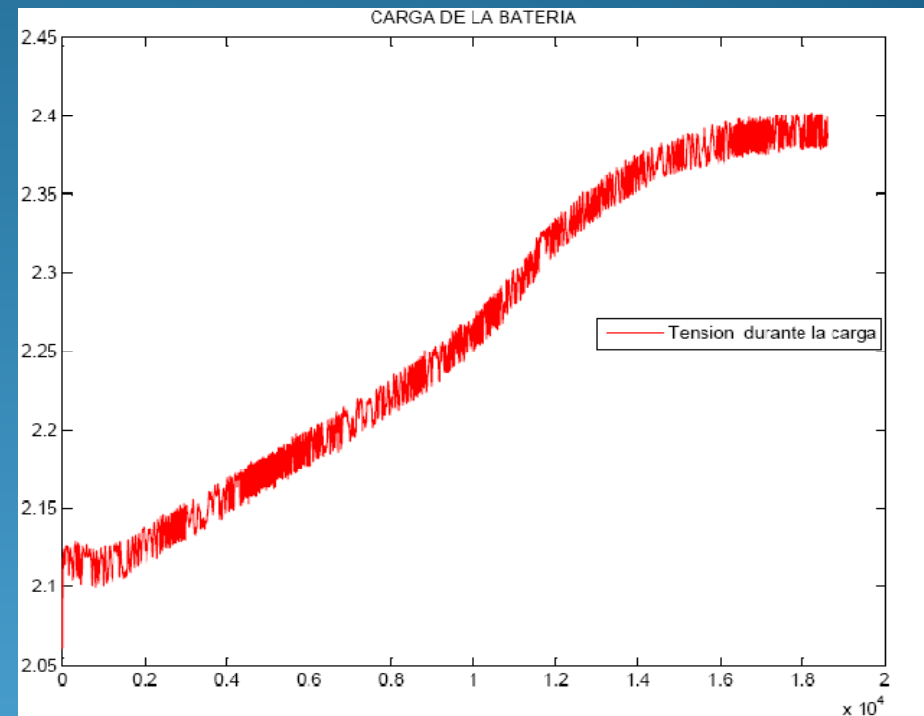
Resultado de los ensayos

DESCARGA	TIEMPO (s)	INTENSIDAD	C(I, θ) (Ah)
C1	3309	86,684	79,7493
C3	10280	39,0316	111,9696
C5	16250	27,0868	123,2329
C10	28960	15,7365	126,7222
C100	268020	2,1851	160,3446
10 A	44055	10,1011	123,6124
20 A	19735	19,9443	109,3613

Curvas de tensión típicas



DESCARGA C₁₀



CARGA DE LA BATERIA

Índice

1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Simulaciones de los ensayos realizados

- Se han simulado las mismas descargas que en los ensayos.
- Con el modelo de tercer orden también se ha simulado la carga de la batería, aunque no se obtienen buenos resultados.
- Ajuste de los modelos se hecho con la ayuda de un fichero de Matlab.
- Los demás parámetros se obtienen mediante un ajuste manual hasta conseguir que las curvas se aproximen.
- El modelo de tercer orden se ha ajustado para la descarga C_{10} .
- El modelo de cuarto orden se ha ajustado para la descarga C_3 .

Índice

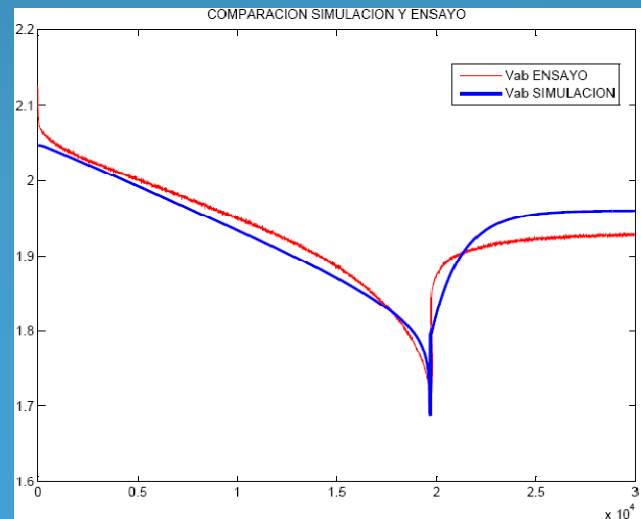
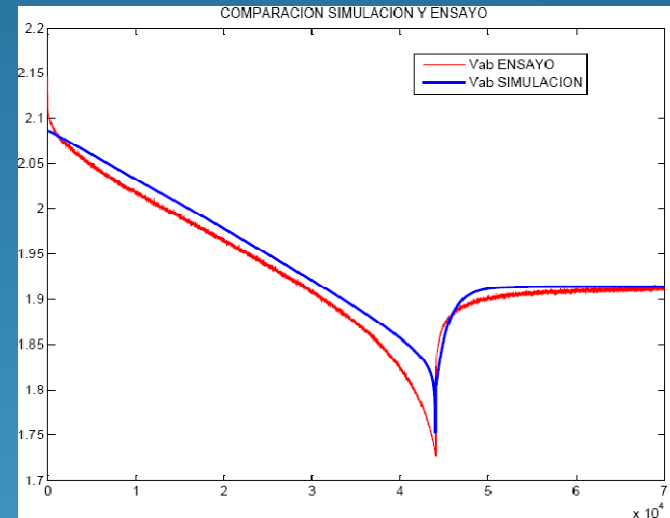
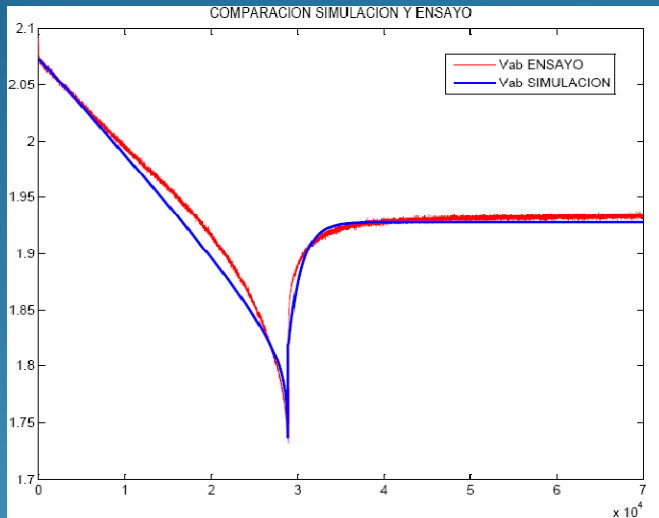
1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Comparación de datos de las simulaciones con los ensayos

- Se han hecho las comparaciones para así validar los modelos.
- TERCER ORDEN, hemos definido dos intervalos de intensidades:
 - El primero es $10 A < I_d < 20 A$, en este intervalo de intensidades el modelo comete un error máximo con el ajuste que hemos hecho de un **1,5%**.
 - El segundo es $2,18 A < I_d < 39 A$, en este intervalo se comete un error máximo de un **5%**.
 - Vemos que a medida que ampliamos el intervalo el error aumenta
- CUARTO ORDEN, solo hemos estudiado un intervalo amplio, centrado en la descarga C_3 :
 - El intervalo es $20 A < I_d < 87 A$, con un error máximo de un **2%**.

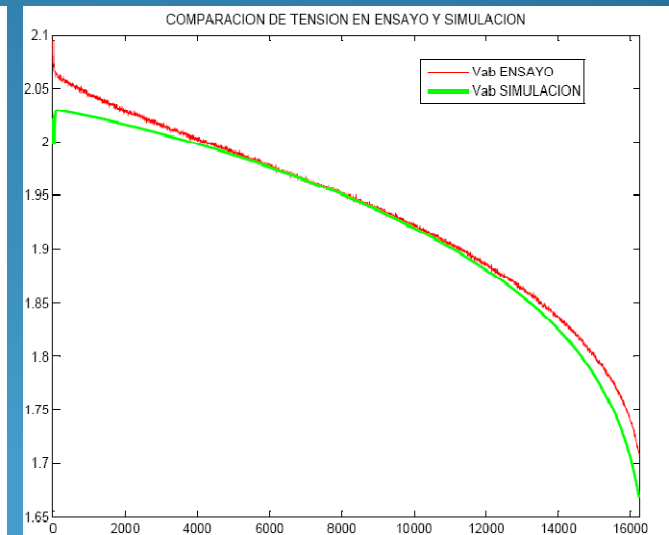
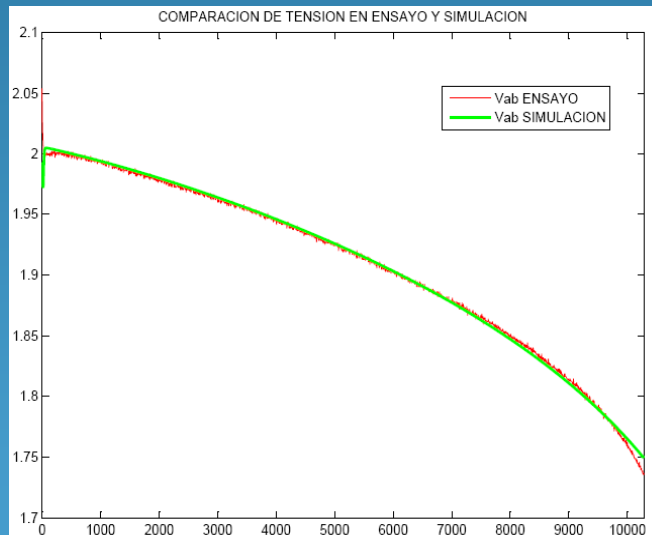
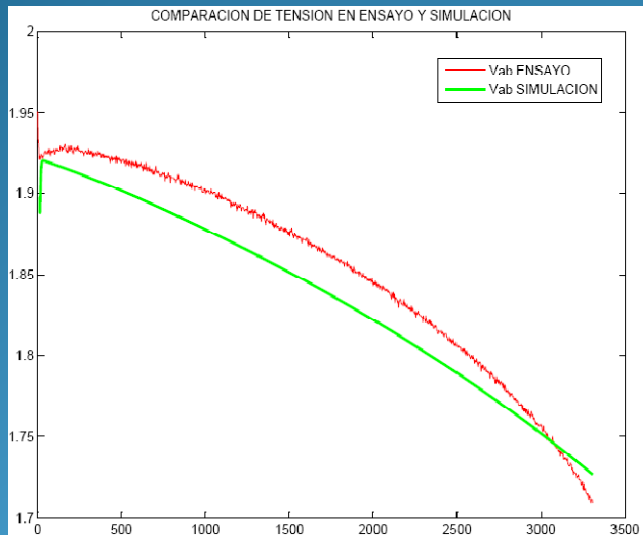
Comparaciones gráficas

- Modelo de tercer orden & ensayo: descargas C₁₀, 10 A y 20 A.



Comparaciones gráficas

- Modelo de cuarto orden & ensayo: descargas C_1 , C_3 y C_5



Índice

1. INTRODUCCION
2. MODELOS PROPUESTOS
3. ENSAYOS REALIZADOS
4. SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS
5. COMPARACIONES DE DATOS
6. CONCLUSIONES

Conclusiones

- Hemos validado mediante ensayo y simulación ambos modelos.
- MODELO DE 3er ORDEN es preciso si no estamos en un rango amplio de intensidades.
- El de 3er orden puede valer si no queremos mucha precisión pero si que funcione en un intervalo bastante amplio.
- El modelo de tercer orden no vale para cargas a intensidad variable, el error es muy elevado.
- MODELO DE 4to ORDEN es adecuado cuando necesitamos precisión y descargas muy dispares.
- Hubiese sido interesante solucionar los problemas con la rama parasita para poder simular la carga, no se ha hecho por falta de tiempo.
- Por lo tanto considero que se han cumplido los objetivos de este PFC.

FIN

Muchas gracias por su atención