

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, DE COMPUTADORES Y SISTEMAS**

TESIS

**“CARGA RÁPIDA DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DE MEDIA Y
GRAN CAPACIDAD. ANÁLISIS, SÍNTESIS Y COMPARACIÓN DE
NUEVOS MÉTODOS”**

por

Juan Carlos Viera Pérez

**Presentada para la obtención del
Grado de Doctor por la Universidad de Oviedo**

Gijón, Abril de 2003

TESIS

“CARGA RÁPIDA DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD. ANÁLISIS, SÍNTESIS Y COMPARACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS”

por

Juan Carlos Viera Pérez

Presentada en el

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
DE COMPUTADORES Y DE SISTEMAS**

de la

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Para la obtención del
Grado de Doctor por la Universidad de Oviedo**

Gijón, Abril de 2003



Universidad
de Oviedo

Reservados todos los derechos
© El autor

Edita: Universidad de Oviedo
Biblioteca Universitaria, 2008
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 36

ISBN 978-84-691-6703-8
D.L.: AS.05353-2008



TESIS DOCTORAL

“CARGA RÁPIDA DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD. ANÁLISIS, SÍNTESIS Y COMPARACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS”

Por: Juan Carlos Viera Pérez

Directora de la tesis: Dña. Manuela González Vega

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente: Dr. D. Joan Peracaula Roura

Secretario: Dr. D. Francisco Javier Ferrero Martín

Vocales: Dr. D. Carlos Martínez-Peñalver Freire

Dr. D. Antonio Lumbreras Azanza

Dr. D. Esteban Sanchís Kilders

AGRADECIMIENTOS:

Quiero expresar mi agradecimiento a mi directora de tesis, a mi tutor y a todos los compañeros que han contribuido de una u otra forma en la realización de este trabajo.

Gracias a todos por el apoyo prestado a lo largo de estos años.

*A mi abuelo Juan Viera, por ayudarme a dar mis primeros pasos
transmitiéndome sus conocimientos y su pasión por la técnica*

A mi esposa Elena por su colaboración y apoyo incondicional

OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

Cada día aumenta el número de aplicaciones que necesitan energía eléctrica para funcionar de forma independiente de la red eléctrica (vehículos industriales como carretillas paletizadoras, vehículos comerciales como sillas de ruedas, automóviles, pequeños vehículos de recreo, motocicletas, etc.); es decir, aplicaciones que funcionan de forma autónoma y que necesitan una fuente de energía propia. En este tipo de aplicaciones las baterías juegan un papel muy importante, ya que constituyen la fuente de energía primaria.

Uno de los principales inconvenientes de la utilización de baterías en las aplicaciones mencionadas, es el tiempo requerido para realizar la carga una vez que éstas se han descargado. Generalmente se necesitan más de 10 horas para reponer la energía gastada (carga lenta) y durante este tiempo el sistema queda detenido o puede continuar funcionando sólo si se dispone de baterías de reserva, lo que genera unos costes elevados.

La necesidad de reducir al máximo los tiempos de carga ha sido y es objeto de numerosas investigaciones. Estas investigaciones están orientadas hacia varios campos: mejora de las tecnologías de baterías existentes, búsqueda de nuevas tecnologías con mejores prestaciones y desarrollo de métodos de carga (incluyendo criterios de finalización de la carga) que garanticen la carga de la batería de forma rápida y segura.

En numerosos artículos publicados en congresos y revistas internacionales se describen diferentes diseños de cargadores de baterías (convertidores de potencia) que utilizan razones de carga elevadas para recargar la batería y disminuir drásticamente los tiempos de carga. Sin embargo, se desconoce el comportamiento de las baterías cuando se las somete a estas condiciones ya que se carece de este estudio.

Esta tesis se centra en el estudio de las características tanto en carga como en descarga de las tecnologías de baterías de media y gran capacidad que se utilizan

en aplicaciones cíclicas de carga-descarga, las tecnologías de Ni-Cd y Ni-MH, haciendo especial incidencia en su comportamiento ante carga rápida.

El estudio del comportamiento de las baterías bajo carga rápida es vital en el desarrollo de métodos de carga y de criterios de finalización de carga, eficientes y fiables. De ahí que el estudio realizado concluya con la propuesta de un método de carga rápida que evita los problemas asociados tradicionalmente a la aplicación de regímenes de carga elevados

A continuación se detalla la estructura que se ha seguido para la descripción del trabajo realizado.

En el capítulo 1, se describe el estado del arte de las tecnologías de baterías de media y gran capacidad que se utilizan en aplicaciones cíclicas de carga-descarga. En este capítulo se definen los principales índices de comportamiento que fijan las características de las tecnologías de baterías, facilitándose una mejor comprensión del análisis que se realiza de los mismos.

Después del análisis comparativo de las diferentes tecnologías de baterías se seleccionan aquellas que se consideran las más adecuadas para la aplicación de carga rápida. A partir de este momento la atención queda centrada en las tecnologías de Ni-Cd y de Ni-MH.

En el capítulo 2 se estudia el comportamiento en descarga de las baterías, lo que permite conocer mejor los fenómenos que tienen lugar durante este proceso y las variaciones que se producen en función de las condiciones de funcionamiento (fundamentalmente la temperatura).

Antes de analizar cualquier fenómeno asociado con la carga rápida o con cualquier proceso de carga de forma general, es importante conocer la propia influencia del proceso de descarga y de las condiciones en que éste se realiza sobre un ciclo completo de carga-descarga. De esta forma, al analizar los experimentos realizados se pueden separar los efectos asociados a la descarga del comportamiento de la batería durante la carga.

Una vez descrito el comportamiento de las baterías durante la descarga y antes de comenzar el estudio de las características de carga, en el capítulo 3 se detalla la metodología de ensayos desarrollada específicamente para el estudio de los procesos de carga rápida.

Además, se describen los bancos de ensayos diseñados para la implementación de dicha metodología y finalmente, se detalla la forma en que se han realizado los análisis de los resultados obtenidos. Por tanto, este capítulo valida las conclusiones de los estudios.

En el capítulo 4, se realiza el estudio de las características de carga de las baterías bajo diferentes razones de carga y diferentes condiciones de temperatura ambiente. Por tanto, este capítulo sirve de base para definir los márgenes de funcionamiento adecuados en carga (razones de carga y temperaturas de trabajo) y para evaluar los diferentes criterios de detección de fin de carga. Además aporta información suficiente para el desarrollo de métodos fiables de carga rápida.

En el capítulo 5, se abordan desde un punto de vista crítico los distintos métodos de carga y criterios de finalización de fin de carga que se utilizan en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH. En este capítulo se detallan los problemas asociados a cada método de carga utilizando los resultados obtenidos de los ensayos descritos en el capítulo 4.

En el capítulo 6 se propone un método optimizado de carga rápida para las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH, utilizando como base el análisis sobre los métodos de carga y sobre los criterios de finalización de carga realizado en el capítulo 5 y además, teniendo presente el comportamiento en carga observado durante la experimentación (capítulo 4). Este método de carga incluye la definición del régimen de carga y del criterio de finalización de carga a aplicar para minimizar el tiempo de carga, evitando sobrecargas indeseadas. En este capítulo se justifica la fiabilidad del método sobre la base de los experimentos realizados.

Finalmente, en el capítulo 7 se exponen las conclusiones de esta tesis doctoral y las principales aportaciones realizadas. Además, se enumeran una serie de sugerencias o propuestas para futuros trabajos teniendo en cuenta nuevas ideas surgidas

durante la investigación desarrollada y que no ha sido posible estudiar en este trabajo.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1

1	ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD UTILIZADAS EN APLICACIONES CÍCLICAS	1-3
1.1	INTRODUCCIÓN	1-3
1.2	CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS.....	1-4
1.3	TERMINOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS	1-7
1.3.1	Terminología utilizada para describir las características de una batería desde el punto de vista constructivo	1-8
1.3.2	Terminología utilizada para describir las características de una batería desde el punto de vista funcional.....	1-14
1.4	COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS	1-20
1.4.1	Baterías de plomo-ácido	1-22
1.4.1.1	Reacciones electroquímicas	1-22
1.4.1.2	Características funcionales de las baterías de plomo-ácido.....	1-25
1.4.1.3	Baterías de plomo-ácido de válvula regulada	1-26
1.4.2	Baterías de níquel-cadmio	1-28
1.4.2.1	Reacciones electroquímicas	1-29
1.4.2.2	Características funcionales de las baterías de níquel-cadmio.....	1-32
1.4.3	Baterías de níquel-hidruro metálico	1-33
1.4.3.2	Características funcionales de las baterías de níquel-hidruro metálico.....	1-35

1.5	OTRAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS	1-37
1.5.1	Otras tecnologías de baterías que utilizan un electrodo positivo de níquel	1-37
1.5.1.1	Baterías de níquel-hierro	1-38
1.5.1.2	Baterías de níquel-zinc	1-39
1.5.2	Tendencias futuras: baterías de litio-ion.....	1-39
1.6	COMPARACIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ÓPTIMAS PARA LA APLICACIÓN DE CARGA RÁPIDA.....	1-41
1.6.1	Baterías seleccionadas para los ensayos	1-45
1.7	ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS DE LA CARGA DE BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD PARA APLICACIONES CÍCLICAS.....	1-49
1.7.1	Métodos de carga utilizados en baterías para aplicaciones cíclicas	1-50

CAPÍTULO 2

2	CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE DESCARGA DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH.....	2-3
2.1	INTRODUCCIÓN	2-3
2.2	EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN Y DE LA TEMPERATURA EN LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH DURANTE LA DESCARGA.....	2-4
2.2.1	Circuito equivalente de las baterías	2-4
2.2.1.1	Variables que influyen sobre la tensión de vacío	2-8
2.2.1.1.1	Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la tensión de vacío de las baterías de Ni-Cd	2-9
2.2.1.1.2	Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la tensión de vacío de las baterías de Ni-MH	2-11
2.2.1.2	Variables que influyen sobre la resistencia interna equivalente.....	2-14
2.2.1.2.1	Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la resistencia equivalente de las baterías de Ni-Cd	2-16
2.2.1.2.2	Influencia del estado de descarga y de la temperatura en la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-MH durante el proceso de descarga.....	2-19
2.2.2	Características de la tensión en descarga de las baterías.....	2-21

2.2.2.1	Evolución de la tensión y de la temperatura en las baterías de Ni-Cd durante la descarga.....	2-22
2.2.2.2	Evolución de la tensión y de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante la descarga.....	2-27
2.3	LA CAPACIDAD	2-31
2.3.1	Influencia de la razón de descarga y de la temperatura de trabajo sobre la capacidad real de las baterías	2-32
2.3.2	Influencia de la tensión de finalización de la descarga sobre la capacidad real de las baterías.....	2-33
2.4	OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DURANTE LA DESCARGA	2-35
2.4.1	La inversión de la polaridad de la celda.....	2-36
2.4.2	El efecto memoria	2-37

CAPÍTULO 3

3	METODOLOGÍA DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN CARGA DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH	3-3
3.1	INTRODUCCIÓN	3-3
3.2	BATERÍAS EMPLEADAS EN LA EXPERIMENTACIÓN.....	3-4
3.3	OBJETIVOS DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS	3-9
3.4	EL BANCO DE ENSAYOS	3-12
3.4.1	Implementación del banco de ensayos.....	3-14
3.4.1.1	Equipamiento.....	1-14
3.4.1.2	Medidas realizadas durante los ensayos	3-17
3.4.1.3	El software de control del banco de ensayos.....	3-25
3.5	METODOLOGÍA DE ENSAYOS DESARROLLADA PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE CARGA RÁPIDA EN BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD.....	3-29
3.5.1	Ciclos de acondicionamiento	3-29
3.5.2	Ensayos para el estudio de los procesos de carga.....	3-34

3.5.2.1 Selección del método de finalización de los procesos de carga en los ensayos realizados.....	3-37
3.5.3 Otras condiciones de funcionamiento de interés.....	3-43
3.6 MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE RESULTADOS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS	3-44
3.6.1 Software de análisis de los datos obtenidos de los ensayos	3-49

CAPÍTULO 4

4 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE CARGA DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH.....	4-3
4.1 INTRODUCCIÓN.....	4-3
4.1.1 Índices empleados en el análisis del comportamiento de las baterías durante los procesos de carga	4-4
4.1.1.1 La aceptación de carga	4-4
4.1.1.2 La eficiencia energética durante la carga.....	4-7
4.1.2 Condiciones de carga que afectan la capacidad real que puede suministrar una batería durante su descarga.....	4-8
4.1.2.1 La temperatura durante el proceso de carga	4-9
4.1.2.2 La razón de carga aplicada	4-10
4.1.2.3 El tiempo de carga.....	4-11
4.1.3 La sobrecarga como fenómeno no deseado en las baterías en estudio.....	4-11
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA EN LA TECNOLOGÍA DE Ni-Cd	4-15
4.2.1 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd en función de la razón de carga utilizada a 23 °C de temperatura ambiente	4-15

4.2.1.1 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,1C	4-16
4.2.1.2 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,2C	4-19
4.2.1.3 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,5C	4-22
4.2.1.4 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 1,0C	4-25
4.2.1.5 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 2,0C	4-28
4.2.1.6 Conclusiones acerca del comportamiento de las baterías de Ni-Cd a diferentes razones de carga a 23 °C.....	4-32
4.2.2 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-Cd bajo distintas razones de carga y en función de la temperatura ambiente	4-38
4.2.2.1 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 0,5C.....	4-39
4.2.2.1.1Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 0,5C	4-39
4.2.2.1.2Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 0,5C	4-39
4.2.2.1.3Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 0,5C	4-42
4.2.2.1.4Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 0,5C	4-44
4.2.2.1.5Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 0,5C y diferentes temperaturas.	4-47
4.2.2.2 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 1,0C.....	4-51
4.2.2.2.1Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 1,0C	4-51

4.2.2.2	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 1,0C	4-51
4.2.2.3	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 1,0C	4-53
4.2.2.4	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 1,0C	4-55
4.2.2.5	Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 1,0C y diferentes temperaturas.	4-58
4.2.2.3	Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 2,0C	4-61
4.2.2.3.1	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 2,0C	4-61
4.2.2.3.2	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 2,0C	4-62
4.2.2.3.3	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 2,0C	4-64
4.2.2.3.4	Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 2,0C	4-65
4.2.2.3.5	Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 2,0C y diferentes temperaturas.	4-67
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA EN LA TECNOLOGÍA DE Ni-MH	4-71
4.3.1	Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH en función de la razón de carga utilizada y manteniendo en 23 °C la temperatura ambiente	4-72
4.3.1.1	Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,1C	4-73
4.3.1.2	Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,2C	4-76

4.3.1.3 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C.....	4-78
4.3.1.4 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C.....	4-81
4.3.1.5 Conclusiones acerca del comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a diferentes razones de carga y temperatura de 23 °C	4-87
4.3.2 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-MH bajo distintas razones de carga y en función de la temperatura ambiental	4-92
4.3.2.1 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 0,5C.....	4-93
4.3.2.1.1 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.....	4-93
4.3.2.1.2 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.....	4-93
4.3.2.1.3 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C.....	4-96
4.3.2.1.4 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C.....	4-99
4.3.2.1.5 Conclusiones	4.102
4.3.2.2 Comportamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 1,0C.....	4-105
4.3.2.2.1 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.....	4-105
4.3.2.2.2 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 33 °C.....	4-105
4.3.2.2.3 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C.....	4-108
4.3.2.2.4 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 5 °C.....	4-111

4.3.2.2.5 Conclusiones.....	4-114
-----------------------------	-------

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DURANTE LA APLICACIÓN DE CARGA RÁPIDA	4-118
---	--------------

CAPÍTULO 5

5 MÉTODOS DE CARGA Y CRITERIOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA UTILIZADOS EN BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH	5-3
5.1 MÉTODOS DE CARGA	5-3
5.2 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN LA MEDIDA DEL TIEMPO DE CARGA	5-5
5.2.1 Control del tiempo de carga	5-5
5.2.2 Control del tiempo de carga después de una descarga total de la batería	5-6
5.3 MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADO EN LA MEDIDA DE LA CAPACIDAD CARGADA Y DESCARGADA DE LA BATERÍA.....	5-7
5.4 MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADO EN EL SEGUIMIENTO DE LA PRESIÓN INTERNA DE LA BATERÍA.....	5-9
5.5 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA TEMPERATURA DE LA BATERÍA	5-10
5.5.1 Detección de una temperatura límite en la batería.....	5-11
5.5.2 Seguimiento del incremento de la temperatura de la batería respecto a la temperatura ambiente	5-13
5.5.3 Control diferencial de la temperatura de la batería	5-15
5.5.4 Seguimiento de la derivada de la temperatura de la batería.....	5-17
5.6 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA TENSIÓN DE LA BATERÍA.....	5-20
5.6.1 Seguimiento de la tensión de la batería	5-21
5.6.2 Seguimiento de la derivada de la tensión de la batería.....	5-23

CAPÍTULO 6

6	MÉTODO OPTIMIZADO DE CARGA RÁPIDA PROPUESTO PARA BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD.....	6-3
6.1	MÉTODO DE CARGA ÓPTIMO	6-5
6.2	SELECCIÓN DE LA RAZÓN DE CARGA RÁPIDA ÓPTIMA.....	6-6
6.3	EL MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA.....	6-14
6.4	CARGA DE LLENADO.....	6-21

CAPÍTULO 7

7	CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	7-3
7.1	SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS.....	7-8

BIBLIOGRAFÍA.....	B-1
--------------------------	------------

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Sobretensión de una interfase
η_a	Sobretensión de activación en una interfase
η_c	Sobretensión de concentración en una interfase
C	Capacidad de una batería expresada en amperios-horas
C_p	Condensador equivalente
DOD	Profundidad de la descarga
E	Tensión en terminales de la celda
E_o	Tensión de vacío de la celda
EODV	Tensión de finalización de la descarga
I_c	Corriente de carga de la batería
I_d	Corriente de descarga de la batería
n_c	Aceptación de carga
n_e	Eficiencia energética
R_d	Resistencia retardada equivalente
R_e	Resistencia interna equivalente de la batería
R_h	Resistencia instantánea equivalente
T_d	Constante de tiempo del transitorio inicial de la descarga

CAPÍTULO

1

**ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE
BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD
UTILIZADAS EN APLICACIONES CÍCLICAS**

1 ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD UTILIZADAS EN APLICACIONES CÍCLICAS

1.1 INTRODUCCIÓN

La electricidad es la forma de energía que más se utiliza en nuestros días, fundamentalmente por la facilidad con que se transforma en otras formas de energía. En este sentido, se pueden mencionar innumerables aplicaciones donde la energía eléctrica se convierte en energía mecánica, química o térmica para generar una función específica.

El principal suministro de energía eléctrica se realiza a través de la red eléctrica. Sin embargo, en muchas ocasiones en que se necesita hacer uso de esta energía no se dispone de la red eléctrica o ésta no se puede utilizar directamente debido a los requerimientos específicos de la aplicación (equipos portátiles, señalizaciones marinas, vehículos eléctricos, etc.). Uno de los principales inconvenientes de la energía eléctrica es la dificultad de su almacenamiento. Las baterías son una de las pocas formas fiables de almacenar la energía eléctrica. Estos dispositivos convierten la energía eléctrica en energía química y viceversa; de esta manera se consigue almacenar energía eléctrica en forma de energía química para utilizarla en el momento que falle el suministro de la red eléctrica o simplemente cuando la requieran determinadas aplicaciones que funcionen con independencia de la red.

El desarrollo en los últimos años de nuevas aplicaciones (vehículos eléctricos, sistemas fotovoltaicos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.) han propiciado el surgimiento y desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, cada vez más eficientes y fiables. Así, además de las conocidas baterías de plomo-ácido (Pb-ácido), han surgido otras tecnologías como la de níquel-cadmio (Ni-Cd), la de níquel-hidruro-metálico (Ni-MH) y más recientemente la de litio-ion (Li-ion). Éstas son algunas de las tecnologías más utilizadas, pues existen innumerables

combinaciones químicas que se pueden usar para almacenar energía eléctrica en forma de energía química.

En los siguientes apartados de este capítulo se clasifican los diferentes tipos de baterías y se describe la terminología que se ha adoptado. Además, se realiza un análisis comparativo de las principales tecnologías de baterías de media y gran capacidad que se utilizan en aplicaciones donde se requieren repetidos ciclos de carga-descarga.

El creciente mercado de las baterías ha incentivado la investigación tanto de nuevas combinaciones electroquímicas, que den lugar a tecnologías con mejores prestaciones, como de formas y métodos eficientes de utilización de estos sistemas (selección óptima de tecnologías, mantenimiento, métodos de carga, criterios de detección de fin de carga, etc.).

1.2 CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS

Existen muchas formas de clasificar las baterías, por ejemplo según su diseño (características constructivas), sus características de funcionamiento, el campo de aplicación, etc. Inicialmente, se puede comenzar clasificando las baterías en función de la posibilidad que tienen de ser recargadas una vez que han sido descargadas. En este sentido se pueden definir dos grandes grupos de baterías:

Baterías primarias: Estas baterías no permiten ser recargadas una vez que han sido descargadas. Por tanto, cuando una batería primaria ha agotado su energía debe ser sustituida por otra batería. El campo de aplicación de las baterías primarias se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas y de ahí que sean generalmente de tamaño pequeño.

Baterías secundarias: Estas baterías pueden ser recargadas una vez que han sido descargadas; de ahí que también se les denomine como *baterías recargables* o *acumuladores*. Las baterías secundarias se comercializan en un amplio margen de capacidades, desde capacidades bajas (algunos cientos de miliamperios-horas) hasta capacidades medias y altas (varias decenas o centenas de amperios-horas), y

cada día adquieren mayor importancia sobre todo en aplicaciones donde se necesitan potencias medias y altas. Generalmente, estas baterías están preparadas para funcionar con razones de descarga altas y en un margen amplio de temperaturas.

Este trabajo de investigación se centra en el estudio de los procesos de carga y descarga de baterías y más específicamente, en el estudio del comportamiento de las baterías cuando se les aplica carga rápida. Por este motivo, el trabajo se refiere únicamente al grupo de baterías secundarias.

- **Clasificación de baterías secundarias**

Las baterías secundarias de media y gran capacidad se usan en una gran variedad de aplicaciones, siendo la más popular como baterías de arranque en vehículos con motor de combustión interna (en este caso se les denomina baterías SLI - *Starting, Lighting and Ignition*). Entre otras aplicaciones también se pueden mencionar las siguientes: carretillas paletizadoras, sillas de ruedas autopropulsadas para minusválidos, vehículos ligeros (vehículos de golf, motocicletas), sistemas de energía de emergencia, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAIs), etc. Recientemente ha aumentado significativamente el interés sobre las baterías secundarias como fuente de energía para los vehículos eléctricos y vehículos híbridos [14].

Teniendo en cuenta el gran número de aplicaciones de las baterías secundarias y la forma en que éstas se usan en cada aplicación se pueden subdividir en dos grupos:

- **Baterías que funcionan en régimen estacionario.**

La carga de la batería se realiza desde una fuente de energía primaria (generalmente la red eléctrica) y la descarga tiene lugar sólo de forma ocasional, cuando no está disponible la fuente de energía primaria o cuando ésta no alcanza los requerimientos de funcionamiento de la aplicación. Para mantener a la batería plenamente cargada durante los largos períodos de inactividad se le aplica un régimen continuo de carga (carga de mantenimiento) una vez recargada. Como ejemplos de este tipo de

funcionamiento están las baterías de arranque en vehículos con motor de combustión interna y las baterías empleadas en sistemas de energía auxiliares de aeronaves, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.

➤ Baterías que funcionan bajo regímenes cíclicos de carga-descarga.

En este caso, la batería se descarga sobre un circuito eléctrico al cual sirve como fuente de alimentación y posteriormente se recarga desde una fuente primaria de energía (generalmente la red eléctrica). El uso de estas baterías es similar al de las baterías primarias con la diferencia de que una vez que las baterías secundarias han gastado la energía almacenada pueden volver a recargarse. Dentro de estas aplicaciones se encuentran la mayoría de los sistemas de tracción eléctrica como son los vehículos industriales, los vehículos eléctricos, etc.

La principal diferencia entre una batería secundaria diseñada para funcionar bajo un régimen continuo de ciclos de carga-descarga y otra diseñada para funcionar en régimen estacionario es la capacidad que tienen las primeras de asimilar un número elevado de ciclos de carga-descarga con gran profundidad en la descarga. Por este motivo, la vida útil de una batería diseñada para funcionar en régimen estacionario se expresa en “años de vida” y la vida útil de una batería diseñada para funcionar en regímenes cíclicos se expresa a través del “número de ciclos de carga-descarga” que en ambos casos admiten antes de perder un determinado tanto por ciento de su capacidad nominal (generalmente un 20 por ciento de la capacidad nominal de la batería) [20]. Además, el número de ciclos de carga-descarga a que puede someterse una batería está relacionado directamente con la profundidad de la descarga. Por tanto, la vida útil se indica para un determinado tanto por ciento de descarga, generalmente el 80 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

Puesto que una batería diseñada para aplicaciones cíclicas debe estar preparada para resistir muchos más ciclos de carga-descarga bajo regímenes de funcionamiento severos que una batería diseñada para aplicaciones estacionarias o

de arranque, estas baterías se construyen con estructuras reforzadas (electrodos más resistentes, separadores especiales, etc.) [29][20].

Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento de las baterías secundarias diseñadas específicamente para trabajar en regímenes cíclicos de carga-descarga. Esto se debe a que la necesidad de recargar una batería en el menor tiempo posible está asociada fundamentalmente con las aplicaciones cíclicas (la batería se ve sometida a repetidos ciclos de carga-descarga con descargas profundas) y no con las aplicaciones donde la batería funciona en régimen estacionario (la batería permanece totalmente cargada durante la mayor parte de su vida útil).

Además, y teniendo en cuenta la existencia de un trabajo precedente sobre el estudio de los procesos de carga rápida en baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico de baja capacidad (aplicaciones portátiles) [66][67][68][104] y la falta de información precisa y fiable sobre dichos procesos para baterías de media y gran capacidad, el presente trabajo se ha circunscrito a este último rango de capacidades. Dado que no existe una definición clara en la literatura revisada sobre la clasificación de las baterías diseñadas para trabajar en regímenes cíclicos de carga-descarga teniendo en cuenta el valor de su capacidad nominal, se destaca que cada vez que en este trabajo se hace referencia a baterías de media y gran capacidad se está haciendo referencia respectivamente a baterías cuya capacidad nominal está en el entorno de los 50 Ah (media capacidad) y por encima de los 100 Ah (gran capacidad). Este margen de capacidades abarcan una gran parte de las aplicaciones de regímenes cíclicos de carga-descarga y existe bastante similitud en los aspectos constructivos de las baterías dentro de este margen de capacidades.

1.3 TERMINOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS

A lo largo de todo este trabajo es necesario hacer referencia a diferentes parámetros e índices de comportamiento relacionados tanto con la propia estructura física de los elementos que componen una batería como con los procesos electroquímicos que se producen durante la carga-descarga.

En este sentido, y para facilitar la introducción a los siguientes capítulos de esta tesis, se hace necesario concretar y unificar la terminología a utilizar.

1.3.1 Terminología utilizada para describir las características de una batería desde el punto de vista constructivo

La unidad básica de una batería es la celda, pudiendo estar una batería constituida por varias celdas conectadas en serie o en paralelo con el fin de conseguir la tensión y la capacidad deseada.

Una celda funciona en base a un proceso de reacciones químicas de oxidación y reducción; la oxidación es un proceso de liberación de electrones, mientras que la reducción es un proceso de captación de electrones. Una celda se compone básicamente de cuatro elementos, tal y como se muestra en la figura 1-1: un ánodo, hecho de un material que aporta electrones; un cátodo, preparado para aceptar electrones; el electrólito y el separador. Las principales reacciones electroquímicas se producen en las interfases ánodo-electrólito o cátodo-electrólito según se desarrollen los procesos de carga-descarga [78][15].

Algunas de las principales características asociadas con cada uno de los elementos que componen la celda electroquímica son:

- **Electrodos**

Ánodo o electrodo negativo: Es el elemento que se oxida durante la descarga de la celda aportando los electrones al circuito exterior. Algunos ejemplos de electrodos negativos son el plomo en baterías de plomo-ácido y el cadmio en baterías de níquel-cadmio.

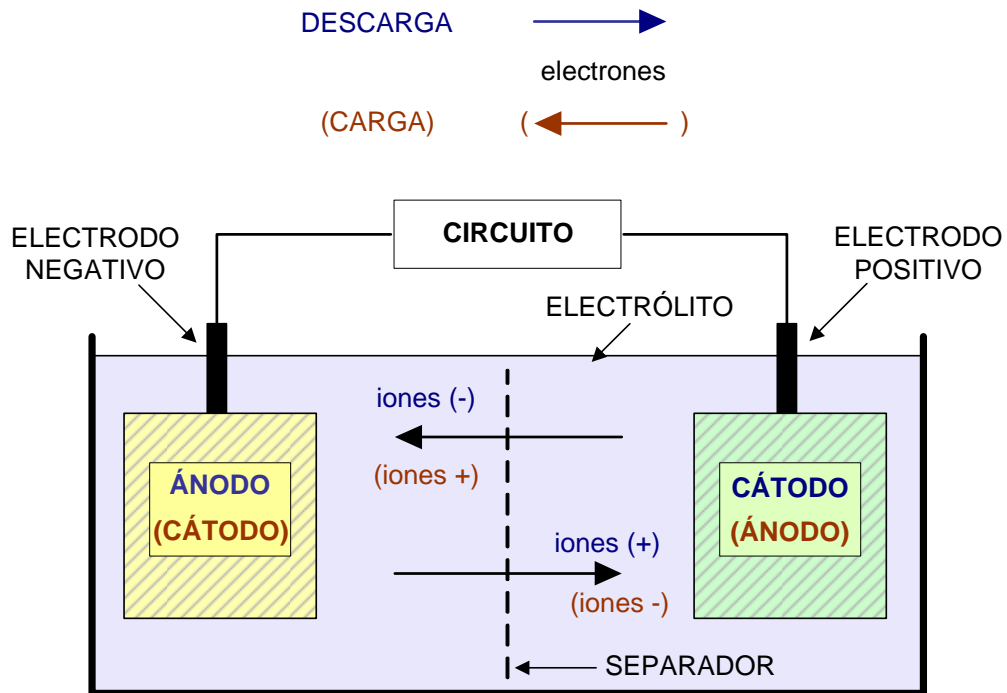


Figura 1-1. Elementos básicos de una celda recargable.

Cátodo o electrodo positivo: Es el elemento que se reduce durante la descarga de la celda aceptando electrones del circuito exterior. Algunos ejemplos de electrodos positivos son el dióxido de plomo en baterías de plomo-ácido y el óxido de níquel en baterías de níquel-cadmio.

Durante la descarga, el ánodo aporta electrones debido a la oxidación y también genera iones positivos. Similarmente, el cátodo genera iones negativos durante el proceso de aceptación de electrones.

Durante la carga, básicamente ocurren los mismos procesos electroquímicos debido a la reversibilidad de las reacciones de oxidación-reducción. En este caso, el electrodo negativo se comporta como cátodo y el electrodo positivo se comporta como ánodo [78].

Típicamente, el electrodo negativo está formado por un metal base y el electrodo positivo está compuesto por un óxido metálico. No obstante, esta definición no es tan restrictiva ya que existen muchas combinaciones de elementos y compuestos que en presencia de algún tipo de electrolito pueden producir corriente eléctrica. Por

supuesto, en este trabajo se ha limitado la discusión a las principales combinaciones de elementos que actualmente se comercializan o están bajo investigación.

Los electrodos de las celdas se componen de la rejilla y el material activo.

- La rejilla constituye el soporte mecánico del material activo y es el conductor eléctrico de la corriente generada por el sistema. Las características más deseadas con respecto al comportamiento de la rejilla en una celda son:
 - Elevada conductividad eléctrica.
 - Buena adherencia de toda la superficie en contacto con el material activo.
 - Elevada resistencia mecánica.
 - Alta resistencia a la corrosión.
 - Elevada sobretensión de desprendimiento de gases.
- El material activo es el elemento donde se desarrollan las reacciones electroquímicas. En la actualidad existen diferentes técnicas para lograr una fijación óptima del material activo a la rejilla siendo la más usual su preparación en forma de una pasta con la consistencia adecuada. Las propiedades más destacadas a la hora de escoger el material activo son:
 - Elevada tensión.

Posibilita una tensión de celda alta reduciendo el número de celdas que hay que conectar en serie para lograr una batería con una determinada tensión.
 - Elevada eficiencia de las reacciones electroquímicas en las que participa.

Permite una eficiencia energética elevada en el proceso de conversión de energía química en energía eléctrica y viceversa.
 - Bajo peso.

Con el empleo de materiales menos pesados pueden conseguirse celdas y, en definitiva, baterías mucho más ligeras.

- Buena estabilidad frente a la rejilla.

Permite el diseño de sistemas más estables, capaces de funcionar adecuadamente durante periodos de tiempo largos sin sufrir degradaciones importantes lo que aumenta su fiabilidad.

- Adecuada porosidad y alta cohesión.

Proporciona a la celda una mayor resistencia, fundamentalmente a esfuerzos mecánicos, lo que contribuye a una mayor estabilidad de la misma durante periodos largos de funcionamiento y, por tanto, aumenta también su fiabilidad.

- Fácil fabricación y bajo coste.

Esta propiedad es importante desde el punto de vista de la penetración en el mercado y de su uso extensivo. Actualmente, existen tecnologías de baterías que a pesar de tener prestaciones altas no ven generalizado su uso por tener costes muy elevados.

- **Electrólito**

El electrólito es un conductor iónico que permite la transferencia de electrones en el interior de la celda por medio del desplazamiento de iones entre el ánodo y el cátodo. Generalmente, el electrólito es una solución acuosa de un ácido, de una base o de sales y su concentración determina en gran medida el comportamiento óptimo de la batería durante su funcionamiento. Las propiedades principales a tener en cuenta cuando se selecciona un electrólito son:

- Alta conductividad iónica.
- Buena estabilidad térmica.
- Bajo efecto corrosivo sobre los electrodos.

- Bajo nivel de impurezas.
- Bajo coste.

- **Separador**

El separador es un elemento fundamental en la celda ya que proporciona aislamiento eléctrico entre el ánodo y el cátodo, evitando cortocircuitos entre electrodos de diferentes polaridades, mientras permite una libre circulación de iones a través del electrólito. Las propiedades a destacar en un buen separador son:

- Elevado poder aislante eléctrico.
- Adecuada porosidad y permeabilidad.
- Buena resistencia mecánica.
- Alta resistencia a la oxidación.
- Ausencias de impurezas y contaminantes.

- **Contenedor**

El contenedor es el recipiente o depósito que contiene a todos los elementos de una celda (electrodos, separadores y electrólito). Varias celdas se pueden interconectar en el interior de un contenedor para proporcionar una determinada capacidad y/o tensión denominándose al conjunto “batería” o “monobloque”.

El contenedor proporciona el soporte y la rigidez mecánica necesaria para el funcionamiento de la batería. Algunas de las características principales que deben tener los contenedores son: elevada resistencia dieléctrica, alta resistencia a los impactos, capacidad para soportar choques térmicos y por supuesto, no degradarse por la acción de los agentes químicos presentes en el interior de la batería [6]. El contenedor puede estar provisto o no de válvulas de seguridad que regulen la expulsión de gases del interior de la batería hacia el exterior [85].

La figura 1-2 muestra la estructura típica de una batería utilizada en regímenes cíclicos de carga-descarga.

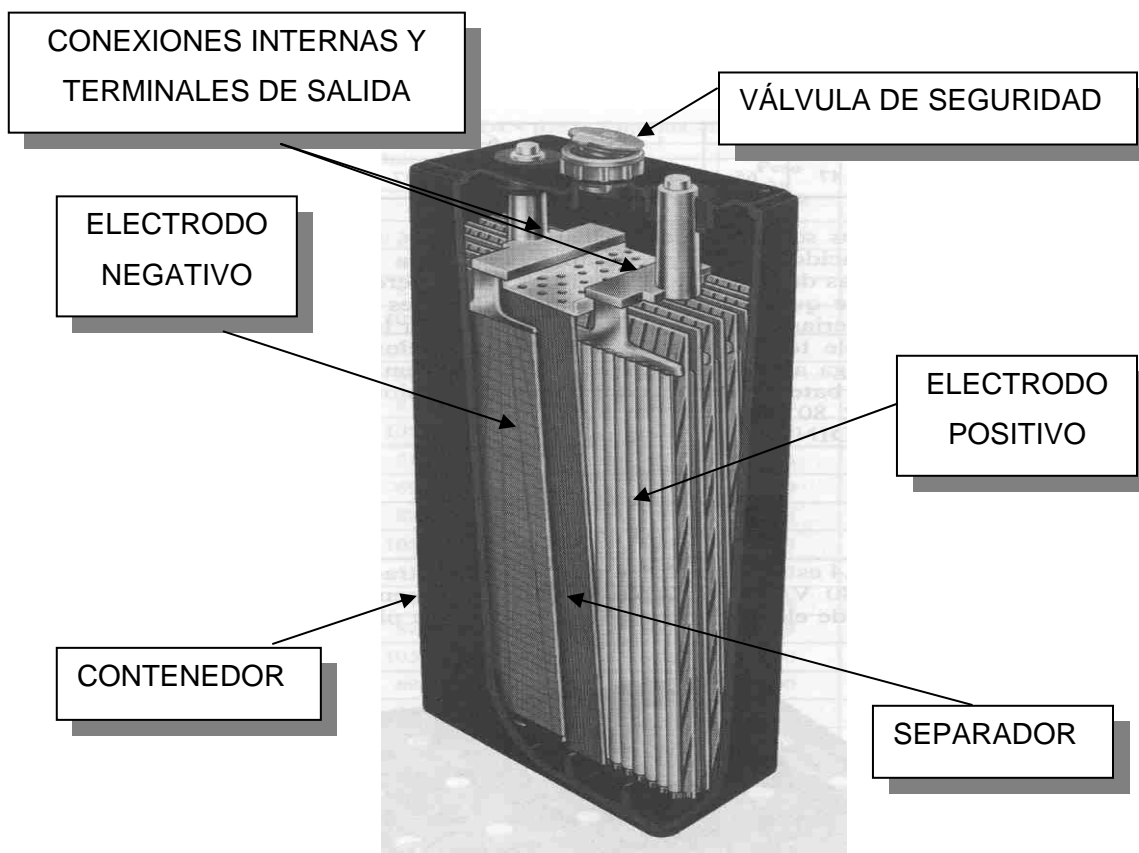


Figura 1-2. Estructura típica de una batería para aplicaciones de regímenes cíclicos de carga-descarga.

Durante el desarrollo del trabajo se hará referencia siempre al término “batería” aunque los resultados se expresarán en muchos casos por celda (por ejemplo, tensión/celda) para que puedan extrapolarse a cualquier batería o combinación de celdas.

Como se ha mencionado en el apartado 1.2, la principal característica de las baterías secundarias es la posibilidad de recargarlas una vez que han sido descargadas. Por tanto, es deseable que la transformación de energía eléctrica en energía química (y viceversa) que se produce durante las reacciones electroquímicas de carga (descarga) sea un proceso totalmente reversible, de una eficiencia alta y que no de lugar a cambios físicos significativos en los elementos del sistema que acorten la vida útil de la batería.

Durante el funcionamiento en regímenes cíclicos de carga-descarga de una batería se producen reacciones secundarias que impiden la reversibilidad completa del proceso y dan lugar a pérdidas que disminuyen la eficiencia del mismo. Por tanto, se debe tratar de minimizar el efecto de estas reacciones que causan además el deterioro de los componentes de la batería con la consiguiente degradación de características y recorte de la vida útil de la misma.

Además, se deben potenciar los compuestos químicos que permitan obtener baterías con mejores prestaciones, gran robustez física y eléctrica, bajo peso y volumen, baja resistencia interna, buen comportamiento en un amplio margen de temperaturas, etc. Evidentemente, los requerimientos mencionados limitan los elementos químicos que se pueden escoger para construir las diferentes tecnologías de baterías secundarias [20].

1.3.2 Terminología utilizada para describir las características de una batería desde el punto de vista funcional

Antes de pasar a evaluar el comportamiento y las prestaciones de las diferentes tecnologías de baterías se hace necesario definir la terminología que se va a emplear a lo largo del presente trabajo ya que no existe en la bibliografía un criterio único al respecto. En relación con las características funcionales:

- ***Tensión:***

La tensión que una batería tiene en sus terminales cuando no se cierra un circuito a través de ellos se denomina “tensión de vacío” (E_0) y su valor depende de la naturaleza de los electrodos y del electrolito, de la concentración de éste último, del estado de carga de la batería y de la temperatura de funcionamiento.

La razón principal por la que la tensión de vacío disminuye a lo largo de la descarga es que los materiales activos de la batería y los productos resultantes de las reacciones electroquímicas son solubles en el electrolito o bien forman compuestos sólidos que se depositan en los electrodos, modificándose las condiciones de partida.

Cuando una batería suministra energía a una carga su tensión disminuye, tanto más cuanto mayor sea la corriente de descarga. Esto se debe a que la diferencia de tensión que aparece entre las dos interfases electrodo-electrólito - zona de contacto metal-solución presente entre los dos electrodo que forman la celda y el electrólito - disminuye al aumentar la densidad de corriente que las atraviesa.

A la variación que sufre la tensión en las interfases electrodo-electrólito de una celda con respecto a las condiciones de vacío como consecuencia del paso de una corriente eléctrica se le denomina “sobretensión” (η). Este fenómeno se produce tanto en la descarga como en la carga de la batería y es la suma de la “sobretensión de activación” (η_a) y de la “sobretensión de concentración” (η_c), ambas relacionadas con los distintos procesos electroquímicos que se producen durante la carga-descarga de la batería [15] [29] [78].

Durante las reacciones electroquímicas de descarga el potencial del electrodo negativo se reduce al igual que el potencial del electrodo positivo. A medida que transcurre la descarga los potenciales de ambos electrodos tienden a igualarse y por tanto, disminuye la tensión de la celda. La figura 1-3 muestra la evolución de los potenciales de los electrodos durante el proceso de descarga.

Además, al aumentar la corriente de descarga aumenta la caída de tensión que se produce en el electrólito. Por tanto, la ecuación de la tensión de una celda durante la descarga es:

$$E = E_0 - (\eta_{af} + \eta_{cf}) - (\eta_{as} + \eta_{cs}) - I_d \cdot R \quad (1.1)$$

donde:

E : tensión de la batería cuando circula una corriente entre sus terminales

E_0 : tensión de la batería en vacío

η_{af} : sobretensión de activación en el electrodo fuente de electrones o cátodo durante la descarga

η_{cf} : sobretensión de concentración en el electrodo fuente de electrones o cátodo durante la descarga

η_{as} : sobretensión de activación en el electrodo sumidero de electrones o ánodo durante la descarga

η_{cs} : sobretensión de concentración en el electrodo sumidero de electrones o ánodo durante la descarga

R : resistencia del electrolito

I_d : corriente durante la descarga de la batería

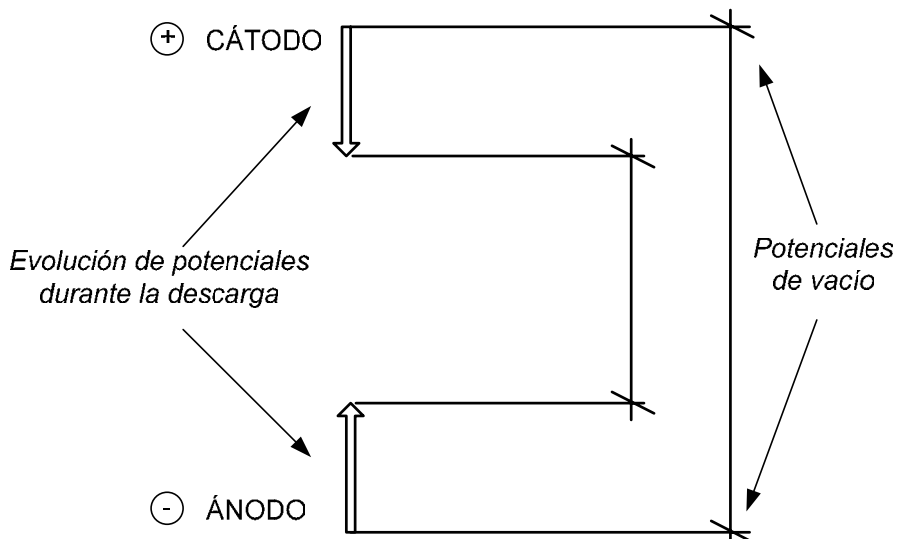


Figura 1-3. Evolución de los potenciales de los electrodos durante la descarga.

Durante las reacciones electroquímicas de carga ocurre el fenómeno contrario, por lo que los potenciales de ambos electrodos se distancian y aumenta la tensión de la celda como se puede observar en la figura 1-4. En este caso, la ecuación de la tensión de la celda es:

$$E = E_0 + (\eta'_{af} + \eta'_{cf}) + (\eta'_{as} + \eta'_{cs}) + I_c \cdot R \quad (1.2)$$

donde:

η'_{af} : sobretensión de activación en el electrodo fuente de electrones o cátodo durante la carga

η'_{cf} : sobretensión de concentración en el electrodo fuente de electrones o cátodo durante la carga

η'_{as} : sobretensión de activación en el electrodo sumidero de electrones o ánodo durante la carga

η'_{cs} : sobretensión de concentración en el electrodo sumidero de electrones o ánodo durante la carga

I_c : corriente durante la carga de la batería

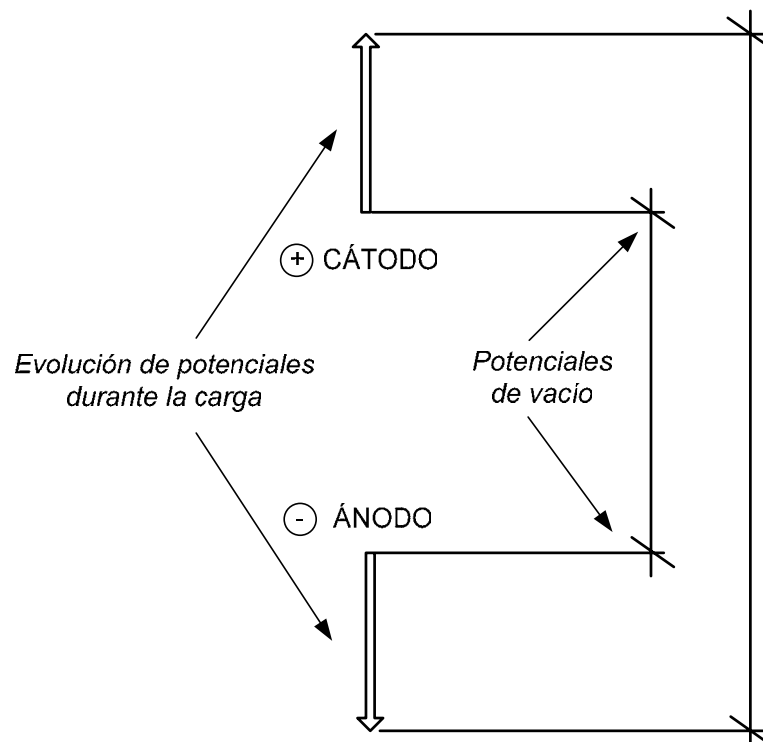


Figura 1-4. Evolución de los potenciales de los electrodos durante la carga.

- **Capacidad**

La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad, medida en amperios-hora (Ah), que puede suministrar o aceptar una batería.

El valor de la capacidad de una batería (C) se calcula como la integral de la corriente a lo largo de un determinado periodo de tiempo (ver ecuación 1.2):

$$C = \int_{t1}^{t2} i \cdot \delta t \quad (1.3)$$

La ecuación 1.3 es de aplicación general tanto para la descarga (capacidad extraída de la batería) como para la carga (capacidad suministrada a la batería). Aunque la ecuación 1.3 es una definición básica de capacidad, existen diferentes definiciones dependiendo de las condiciones bajo las cuales se realiza la medida de capacidad.

Los términos más empleados son:

Capacidad nominal: Capacidad que puede entregar una batería desde plena carga hasta alcanzar una tensión en descarga determinada, a una temperatura ambiente fijada y utilizando una razón de descarga específica. Por ejemplo, una batería tiene una capacidad nominal de 100 Ah cuando descargándola desde su estado de plena carga con una corriente constante de 20 A y a temperatura de 23 °C, es capaz de mantener la tensión por encima de 1 V/celda durante al menos 5 horas.

Capacidad real: Capacidad que puede entregar una batería desde su estado de plena carga y en condiciones de funcionamiento diferentes a las establecidas para definir la capacidad nominal de la batería, excepto la tensión de finalización de la descarga. La capacidad real puede ser menor o mayor que la capacidad nominal, dependiendo de la razón de descarga utilizada y de la temperatura ambiente del entorno donde esté funcionando la batería.

Capacidad retenida: Capacidad conservada por la batería después de un periodo de reposo o inactividad.

Capacidad disponible: Capacidad que puede entregar una batería hasta alcanzar una tensión de finalización de descarga no normalizada que viene fijada por una

aplicación específica. Si la tensión de finalización de la descarga es más alta que la normalizada y se mantiene el mismo régimen de descarga y la misma temperatura de funcionamiento, la capacidad disponible es menor que la capacidad nominal de la batería; en el caso contrario, la capacidad disponible es mayor.

Profundidad de descarga: Relación entre la capacidad en amperios-horas (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Por ejemplo, una profundidad de descarga del 80 por ciento en una batería con capacidad nominal de 100 Ah indica que se han descargado 80 Ah y solo restan por descargar 20 Ah. Normalmente, este término se conoce en la literatura técnica como DOD (*Depth Of Discharge*).

Índice C: Es la razón de carga o de descarga expresada en amperios y numéricamente proporcional a la capacidad nominal de la batería en amperios-hora. Con frecuencia se utilizan múltiplos y submúltiplos de este índice para definir la magnitud de la corriente de carga o de descarga de la batería. Por ejemplo, una batería con una capacidad nominal de 100 Ah se carga a una razón de 0,5C (C/2) cuando la corriente de carga es igual a 50 A.

Autodescarga: Pérdida de capacidad de una batería cuando se mantiene en circuito abierto. Generalmente, la autodescarga se expresa en términos de porcentaje de pérdida de capacidad con respecto a la capacidad nominal en un periodo de tiempo de un mes.

Carga Lenta: Proceso de carga mediante el cual se restablece la capacidad que ha sido descargada de una batería en periodos de tiempo largos, 10 horas o más.

Carga Rápida: Proceso acelerado de carga mediante el cual se restablece la capacidad que ha sido descargada de la batería. En este caso suelen utilizarse razones de carga que permiten que la batería alcance su estado de plena carga en tiempos inferiores a las 3 horas. En sistemas debidamente controlados puede reducirse el tiempo de carga hasta por debajo de 30 minutos para alcanzar un estado de carga próximo al de plena carga.

Sobrecarga: Proceso que tiene lugar cuando se continúa la aplicación de carga a una batería después que se pierde la eficiencia de las reacciones electroquímicas.

Densidad de Energía: Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l).

Densidad de Potencia: Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l).

Energía Específica: Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg).

Potencia Específica: Potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg).

Vida útil: Tiempo que la batería puede mantenerse en servicio al no haberse degradado sus características hasta el punto de hacer decrecer sus prestaciones por debajo de unos límites predeterminados. En el caso de baterías recargables este tiempo está relacionado con el número de meses o años de funcionamiento de la batería (en el caso de baterías que funcionan en régimen estacionario) o bien con el número de ciclos de carga-descarga al que se haya sometido la batería (en el caso de baterías que funcionan bajo regímenes cíclicos de carga-descarga).

1.4 COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

En la actualidad existen diversas tecnologías de fabricación de baterías que se han desarrollado con el objetivo de alcanzar determinados índices de funcionamiento. Estos índices de funcionamiento definen las prestaciones que estos dispositivos electroquímicos pueden ofrecer en cada una de las innumerables aplicaciones donde se emplean.

Antes de realizar un análisis de las tecnologías de baterías más utilizadas en la actualidad en aplicaciones cíclicas que requieren baterías de media/gran capacidad, es conveniente realizar un repaso de las características más deseadas en este tipo de aplicaciones:

- Alta densidad de energía y alta energía específica para lograr sistemas de dimensiones más reducidas y de menor peso.
- Alta potencia específica y alta densidad potencia para asegurar picos de corrientes altos durante la descarga.
- Alta eficiencia energética para lograr un uso económico de la energía suministrada por la fuente primaria.
- Baja razón de autodescarga para minimizar las pérdidas de energía durante los períodos de inactividad.
- Posibilidad de carga rápida para disminuir los tiempos de espera durante la recarga.
- Larga vida útil para compensar los costes iniciales.
- Independencia de las condiciones ambientales que posibiliten buen comportamiento ante variaciones climáticas extremas.
- Diseño robusto preparado para resistir abusos tanto eléctricos (sobrecargas o sobredescargas) como mecánicos (vibraciones, golpes, etc.).
- Diseño respetuoso con el medio ambiente, libre de elementos tóxicos contaminantes.
- Bajo mantenimiento para reducir costes.
- Bajo coste para propiciar una mejor aceptación del consumidor.

Evidentemente, todas estas características no están asociadas a un mismo tipo de batería y es necesario llegar a un compromiso en función de los requerimientos de la aplicación [14] [11].

En las secciones siguientes se analizan las principales tecnologías de baterías que actualmente se utilizan en aplicaciones donde se requieren baterías de media y gran capacidad para trabajar bajo regímenes cíclicos de carga-descarga.

1.4.1 Baterías de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido (Pb-ácido) constituyen una parte muy importante del mercado mundial de baterías, entorno al 50 por ciento del mercado total de baterías tanto primarias como secundarias. El dominio de esta tecnología se debe fundamentalmente a la combinación de los siguientes factores: es la tecnología más conocida y establecida (la más antigua), tiene un precio bajo comparada con el resto de tecnologías y gran versatilidad. Existen numerosas aplicaciones donde se emplean las baterías de plomo-ácido además de cómo baterías de arranque en vehículos con motor de combustión y que incluyen desde instalaciones fotovoltaicas, aplicaciones estacionarias (por ejemplo, SAI's) hasta aplicaciones de tracción eléctrica.

1.4.1.1 Reacciones electroquímicas

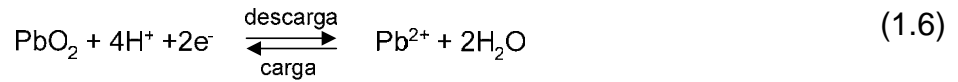
La batería de plomo-ácido utiliza dióxido de plomo como material activo del electrodo positivo y plomo metálico con una estructura muy porosa como material activo del electrodo negativo. Los materiales activos están soportados en rejillas de una aleación de plomo. El electrólito es ácido sulfúrico diluido en un medio acuoso actuando como conductor iónico. En este caso es importante destacar que el electrólito interviene en las reacciones electroquímicas de carga-descarga por lo que se comporta también como un material activo.

Las reacciones electroquímicas que tienen lugar en la tecnología de plomo-ácido son las siguientes:

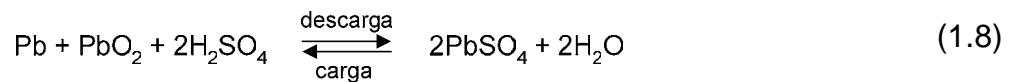
- Electrodo negativo:



- Electrodo positivo:



- Reacción completa:



Como se puede observar en las ecuaciones 1.5 y 1.7, durante la descarga en ambos electrodos el material activo se transforma en sulfato de plomo. Además, en esta reacción se consume electrolito y se forma agua en el electrodo positivo. Por este motivo, durante la descarga se produce una disminución de la concentración del electrolito empleándose en muchas ocasiones esta variación de la concentración para determinar el estado de carga de la batería; para ello se acude al estudio de diferentes propiedades del electrolito como son la densidad o la viscosidad.

El proceso es reversible durante las reacciones de carga de la batería. No obstante, el descenso en la concentración del electrolito no es una función lineal como ocurre durante la descarga. Durante la carga, el ácido sulfúrico generado en los electrodos se va depositando en el fondo del contenedor de la batería debido a su mayor densidad, lo que aumenta la corrosión en la parte inferior de los electrodos al incrementarse la concentración de ácido [23]. Además, esto provoca que la concentración del electrolito en la parte superior de la batería no descienda de forma lineal lo que desvirtúa la medida del estado de carga.

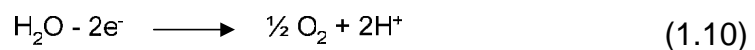
La falta de homogenización del electrolito causada por las diferentes concentraciones en el interior de la batería se denomina “estratificación del electrolito”. En ocasiones la homogenización del electrolito se produce de forma natural debido a la propia acción del medio donde se encuentra funcionando la batería, por ejemplo, la vibración en un vehículo con motor de combustión. En otros casos, la homogenización del electrolito se logra aplicando una corriente de sobrecarga al final del proceso de carga. Cuando la batería se sobrecarga se generan gases y éstos producen una fuerte agitación del electrolito y por tanto la homogenización del mismo.

En sobrecarga, las reacciones electroquímicas producen un desprendimiento de oxígeno en el electrodo positivo y de hidrógeno en el electrodo negativo. Las reacciones electroquímicas de sobrecarga son:

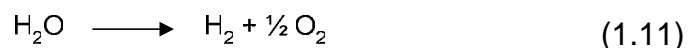
- Electrodo negativo:



- Electrodo positivo:



- Reacción completa:



La pérdida de agua en sobrecarga en forma de oxígeno e hidrógeno obliga a un sistemático mantenimiento para reponer el agua perdida y evitar que los electrodos dejen de estar sumergidos en el electrolito y se produzcan daños irreversibles en la batería.

1.4.1.2 Características funcionales de las baterías de plomo-ácido

Las principales características funcionales de las baterías de plomo-ácido se pueden analizar considerando las ventajas y las desventajas que presenta esta tecnología.

Dentro de las principales ventajas se pueden considerar las siguientes:

- Tecnología totalmente establecida.
- Alta tensión por celda (2 V/celda) lo que permite obtener baterías de mayor tensión con un número menor de celdas conectadas en serie.
- Excelente capacidad para suministrar picos de corriente altos durante la descarga.
- Buen grado de reversibilidad del proceso electroquímico de carga-descarga con una eficiencia satisfactoria (por encima del 80 por ciento).
- Facilidades de reciclado.

Las desventajas más importantes de esta tecnología son:

- Elevado peso debido a la utilización de plomo como material activo.
- Baja energía específica (menor de 40 Wh/kg).
- Corta vida cíclica (500 ó 600 ciclos de carga-descarga).
- No aceptan carga rápida por lo que se necesitan largos periodos de tiempo para la recarga.
- Baja resistencia ante sobrecargas o sobredescargas accidentales.
- Pierden electrólito con facilidad debido a la excesiva producción de gases que tienen lugar durante la sobrecarga.
- Se ven afectadas seriamente por la corrosión de sus electrodos.
- Necesidad de mantenimiento periódico.

Después de hacer un balance de las ventajas y desventajas de las baterías de plomo-ácido, estas baterías no se consideran una buena elección para aplicaciones donde se requieran repetidos ciclos de carga-descarga. A pesar de las mejoras importantes que se han venido realizando en esta tecnología, actualmente no

responden a las exigencias de funcionamiento requeridas en aplicaciones cíclicas de carga-descarga y su mantenimiento en el mercado está avalado fundamentalmente por su precio bajo frente al resto de tecnologías (inferior a 150 €/kWh). Su precio bajo y la gran infraestructura que se ha desarrollado para esta tecnología a lo largo de los años son la principal justificación de que se sigan utilizando en la actualidad.

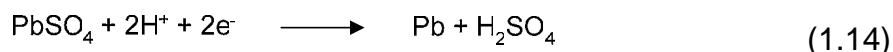
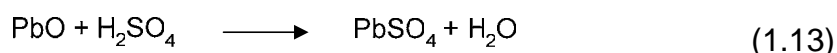
Las investigaciones actuales sobre estas baterías están dirigidas fundamentalmente a lograr una mejora de sus prestaciones en cuanto a reducción de la necesidad de mantenimiento, aumento de la vida útil, disminución del volumen y peso y reducción del tiempo de recarga. En este sentido, las baterías de plomo-ácido de válvula regulada ya son una realidad y abarcan una parte significativa de las aplicaciones donde se emplean baterías de plomo-ácido [91].

1.4.1.3 Baterías de plomo-ácido de válvula regulada

Las baterías de plomo-ácido de válvula regulada, conocidas por sus siglas en inglés como VRLA (*Valve-Regulated Lead Acid*) representan un avance dentro de la tecnología de plomo-ácido. Una de las ventajas fundamentales que aporta esta tecnología es la posibilidad de recombinación de los gases producidos durante las reacciones de sobrecarga, cuando la batería se encuentra próxima a su estado de plena carga. De esta forma se evita la pérdida de electrolito en forma de gases y se reducen las necesidades de mantenimiento de la batería. Es por ello que a este tipo de batería se le denomina “batería libre de mantenimiento” o “batería de recombinación de gases”. También se emplea el término “batería de plomo-ácido sellada” porque para conseguir la recombinación de los gases en el interior de la batería, el contenedor debe estar completamente cerrado y solo permitir el intercambio con el exterior a través de una válvula que abre cuando la presión interior excede determinados límites.

Las reacciones electroquímicas que se producen durante la sobrecarga en una batería de plomo-ácido de válvula regulada se basan fundamentalmente en el principio de la recombinación. Durante las reacciones de recombinación de gases, al oxígeno producido en el electrodo positivo al final de la carga y en sobrecarga se le permite pasar a través del electrolito y del separador hacia el electrodo negativo. La

reacción del oxígeno con el electrodo negativo produce la oxidación del plomo que en presencia del ácido sulfúrico se transforma en sulfato de plomo. La producción de hidrógeno en el electrodo negativo se consume a través de una reacción de reducción con el sulfato de plomo. Las reacciones electroquímicas que se producen durante la recombinación de gases se muestran a continuación:



Otra ventaja de las baterías de plomo-ácido de válvula regulada es que el electrolito se presenta en forma de gel o retenido en un separador de microfibras de vidrio. Esta característica (junto a la recombinación de gases) permite el empleo de las baterías en diferentes posiciones así como en lugares cerrados ya que durante su funcionamiento normal no se producen fugas de líquidos o gases corrosivos que puedan afectar al resto de dispositivos que se encuentran en su entorno.

Por todo lo expuesto, este tipo de baterías ha propiciado nuevas expectativas en cuanto a la utilización de baterías de plomo-ácido dentro del mercado actual, ampliando los horizontes de aplicación y brindando mejores prestaciones [91].

Sin embargo, a pesar del desarrollo alcanzado en este tipo de batería de la tecnología de plomo-ácido, la vida de servicio no supera los 800 ciclos, alcanzándose solo estos valores con los diseños más avanzados [11]. Algunos estudios demuestran la ocurrencia de fallas prematuras debido al empleo de procesos de carga inadecuados [1]. Muchos de los problemas que han presentado estas baterías provienen de la utilización de métodos de carga similares a los utilizados en las baterías de plomo-ácido convencionales. Por supuesto, la presencia

de la recombinación de oxígeno en estas baterías selladas hace necesaria la búsqueda de algoritmos de carga que garanticen un adecuado comportamiento de la batería durante su vida útil.

Además, la energía específica se mantiene por debajo de los 50 Wh/Kg. En cuanto a la reducción del tiempo de recarga, la aplicación de carga rápida presenta serias dificultades ya que la velocidad del proceso de recombinación no garantiza la reducción del gas que se produce de forma temprana en el interior de la batería. En estos casos se fuerza la apertura de la válvula de seguridad y el exceso de gas se expulsa al exterior con la consiguiente pérdida de electrolito.

Por tanto, los desarrollos alcanzados en las baterías de plomo-ácido de válvula regulada las sitúan en cuanto a prestaciones como un paso intermedio entre las baterías de plomo-ácido convencionales y las baterías de níquel-cadmio. Las razones fundamentales que mantienen a esta tecnología como una de las más empleadas son su coste extremadamente bajo con respecto al resto de tecnologías y un proceso de reciclado fácil una vez que termina su vida útil [16] [49].

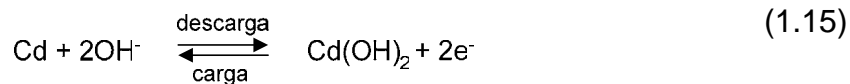
1.4.2 Baterías de níquel-cadmio

Las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) constituyen una de las tecnologías de baterías más establecidas en la actualidad, siendo la de mayor producción después de la de plomo-ácido [53]. Esta tecnología de batería se incluye dentro de las baterías alcalinas, las cuales utilizan como electrolito una solución acuosa de una base, a diferencia de las baterías de plomo-ácido que emplean una solución ácida; en este caso, el electrolito es una solución acuosa de hidróxido de potasio.

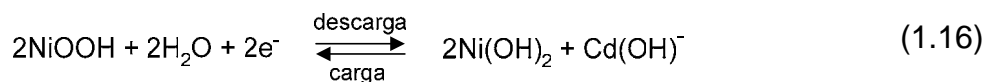
1.4.2.1 Reacciones electroquímicas

Las principales reacciones electroquímicas que se producen en las baterías de níquel-cadmio se muestran a continuación:

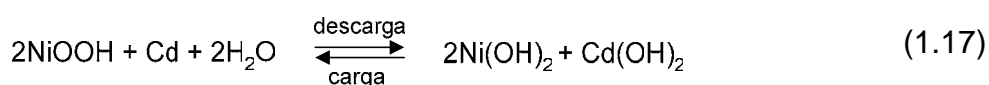
- Electrodo negativo:



- Electrodo positivo:



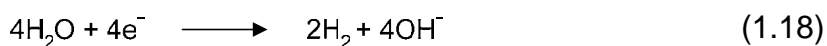
- Reacción completa:



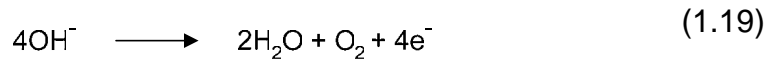
El electrolito en este tipo de batería está compuesto fundamentalmente por hidróxido de potasio y no forma parte de las reacciones electroquímicas que se producen, por lo que su concentración no varía prácticamente durante la carga-descarga de la batería. Además, a diferencia de otros tipos de baterías como las de plomo-ácido, el electrolito no puede usarse para determinar el estado de carga de la batería. Por otro lado, este fenómeno hace que se mantenga invariable el punto de congelación del electrolito con el estado de carga (no varía su concentración) y que la tensión permanezca también prácticamente invariable durante la descarga de la batería.

En la proximidad del estado de plena carga se producen reacciones de sobrecarga debido al empobrecimiento del material activo que aún queda sin transformar. Esto se traduce en un aumento súbito de la tensión de batería provocado por un incremento de su resistencia interna. Durante las reacciones de sobrecarga se produce un desprendimiento de oxígeno en la placa positiva y de hidrógeno en la placa negativa según las siguientes reacciones:

- Electrodo negativo:



- Electrodo positivo:



- Reacción completa:



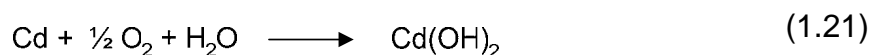
Cuando se aumenta el estado de carga de carga y se produce en el electrodo positivo la conversión de aproximadamente el 80 por ciento del hidróxido de níquel en oxihidróxido de níquel (según la ecuación 1.16) comienza a aumentar la producción de oxígeno según la ecuación 1.19. La producción de oxígeno se mantiene hasta el final de la carga.

El electrodo negativo acepta carga hasta prácticamente el 100 por ciento de su capacidad antes de que se favorezcan las reacciones que dan lugar a la evolución de hidrógeno (ver ecuación 1.18). Cuando se produce hidrógeno la tensión en los terminales de la batería crece rápidamente llegando a superar los 100 mV/celda para una carga a 0,1C [20].

El desprendimiento de gases debido a las reacciones de sobrecarga que se producen próximas al estado de plena carga provoca una pérdida del nivel de electrolito de la batería. En ocasiones se utilizan catalizadores que facilitan las reacciones del hidrógeno y el oxígeno para formar agua [20], evitándose la pérdida de electrolito. No obstante, a partir del comienzo de la producción de hidrógeno el proceso de carga se vuelve bastante ineficiente y se recomiendan razones de carga bajas para alcanzar estados de carga próximos al 100 por ciento de la capacidad nominal.

Al igual que en el caso de las baterías de plomo-ácido, existen baterías de níquel-cadmio selladas [47]. En estas baterías también se facilita la recombinación de los gases producidos durante la sobrecarga de los electrodos de cada una de las celdas. En el electrodo positivo (que alcanza la sobrecarga antes que el electrodo negativo) se produce oxígeno que alcanza el electrodo positivo alcanza el electrodo

negativo y reacciona formando hidróxido de cadmio, según se puede ver en la ecuación 1.21.



Estas baterías exhiben un buen comportamiento cuando se utilizan bajo regímenes de carga lenta y, además, reducen las necesidades de mantenimiento ya que evitan la pérdida de agua del electrolito.

No obstante, la eficiencia de las reacciones de recombinación de las baterías selladas es bastante baja cuando se trabaja con razones de carga altas. En estos casos, la totalidad del gas producido en sobrecarga no se recombina y tiene que ser expulsado al exterior cuando se supera el límite de presión de la válvula de seguridad. De ahí que las baterías abiertas de níquel-cadmio sean más resistentes a sobrecargas que las baterías selladas y por tanto, tengan una mayor capacidad para asimilar carga rápida.

1.4.2.2 Características funcionales de las baterías de níquel-cadmio

Desde el punto de vista funcional las baterías de níquel-cadmio superan en sus prestaciones a la tecnología de plomo-ácido (baterías de plomo-ácido tanto abiertas como de válvula regulada).

Las ventajas principales de la tecnología de níquel-cadmio son:

- Tecnología muy establecida.
- Elevada estabilidad de la tensión en sus terminales durante gran parte de la descarga.
- Alta energía específica (por encima de 60 Wh/kg, un 30 por ciento superior a lo alcanzado con las baterías de plomo-ácido).
- Densidad de energía aceptable (entorno a 90 Wh/l, un 10 por ciento superior a lo alcanzado en baterías de plomo-ácido)

- Buen comportamiento funcionando en un amplio margen de temperaturas (-40 °C ÷ 45 °C).
- Vida cíclica larga (por encima de los 1.500 ciclos de carga descarga, 2 o 3 veces lo alcanzado por la tecnología de plomo-ácido).
- Buena aceptación de carga utilizando razones elevadas de carga.
- Gran robustez ante abusos tanto eléctricos como mecánicos.
- Gran fiabilidad, no fallan de forma repentina como las baterías de plomo-ácido.

A pesar de las grandes ventajas de esta tecnología de batería existen inconvenientes que han frenado su uso más generalizado. Las desventajas principales de las baterías de níquel-cadmio son:

- Precio elevado, más del doble que en el caso de las baterías de plomo-ácido (por encima de los 300 €/kWh), aunque el aumento de la producción está propiciando una bajada de los precios.
- Dentro de los componentes utilizados en la fabricación de estas baterías se encuentra el cadmio, elemento altamente contaminante y que obliga a aumentar la eficiencia en el reciclado de estas baterías una vez que quedan fuera de servicio. En la actualidad existen técnicas para el reciclado total de este tipo de baterías y los esfuerzos encaminados en este sentido están apoyados de forma conjunta por los gobiernos y los grandes fabricantes de baterías [46].
- La tensión nominal es de 1,2 V/celda (frente a 2 V/celda de la tecnología de plomo-ácido) lo que requiere la conexión en serie de un mayor número de celdas para alcanzar una determinada tensión de batería en una aplicación específica.

1.4.3 Baterías de níquel-hidruro metálico

Las baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) constituyen una tecnología de batería avanzada que va ocupando cada vez más espacio dentro del mercado de baterías recargables en aplicaciones de regímenes cíclicos de carga-descarga. Esta tecnología de batería no es una tecnología establecida como la de níquel-cadmio y en las condiciones actuales del mercado debe competir con otras tecnologías avanzadas de baterías (como la de litio-ion) que están ofreciendo características de funcionamiento muy atractivas.

1.4.3.1 Reacciones electroquímicas

Cuando una batería de níquel-hidruro metálico se encuentra cargada, el material activo del electrodo positivo es el oxihidróxido de níquel al igual que en una batería de níquel-cadmio y el material activo del electrodo negativo es el hidrógeno en forma de hidruro metálico, una aleación metálica que permite almacenar el hidrógeno que se genera durante la carga y liberarlo durante la descarga [15]. Este electrodo negativo es el responsable de que se pueda conseguir mayor capacidad por unidad de volumen que en la tecnología de níquel-cadmio. Además, la sustitución del cadmio por una aleación metálica como material activo del electrodo negativo reduce de forma considerable el impacto medioambiental [20][90][112].

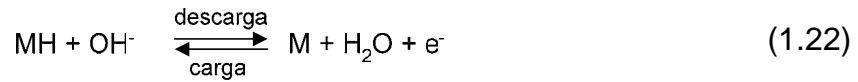
Algunas de las formas básicas de la aleación metálica (M) en las baterías de níquel-hidruro metálico son:

- Aleación de tipo AB_5 que consiste en una mezcla de níquel (B) y tierras raras (A).
- Aleación de tipo AB_2 que consiste en una mezcla de hidruro de circonio o de titanio (A) y otro metal como níquel, cobalto, aluminio, etc. (B).

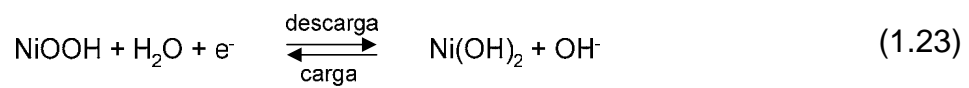
El electrólito en las baterías de níquel-hidruro metálico está compuesto fundamentalmente por hidróxido de potasio al igual que en las baterías de níquel-cadmio.

Las reacciones electroquímicas que tienen lugar en las baterías de níquel-hidruro metálico son:

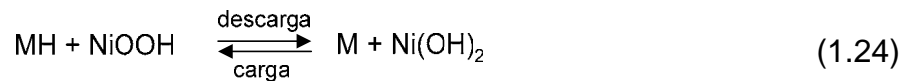
- Electrodo negativo:



- Electrodo positivo:

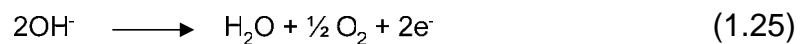


- Reacción completa:

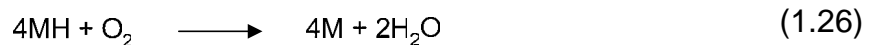


Las reacciones durante la sobrecarga son:

- Electrodo positivo:



- Electrodo negativo



Prácticamente, la totalidad de las baterías de níquel-hidruro metálico que se comercializan actualmente son selladas. La presencia del hidrógeno como parte del material activo en estas baterías obliga a concebir un sistema sellado, de lo contrario se produciría la pérdida directa del material activo y se afectaría seriamente la reversibilidad del sistema. El principio de funcionamiento de esta tecnología se basa

precisamente en las reacciones de absorción y desabsorción del hidrógeno en el electrodo negativo.

1.4.3.2 Características funcionales de las baterías de níquel-hidruro metálico

La tecnología de níquel-hidruro metálico tiene características eléctricas similares a la tecnología de níquel-cadmio. La tensión nominal por celda es 1,2 V y las curvas de carga y de descarga son bastante parecidas, lo que permite en muchas aplicaciones el uso de uno u otro tipo de batería sin modificaciones importantes en la estructura general del sistema donde sirven como fuente de energía.

Las ventajas principales que exhiben las baterías de níquel-hidruro metálico frente a las de níquel-cadmio son:

- Elevada energía específica (por encima de los 90 Wh/kg, un 30 por ciento más que la tecnología de níquel-cadmio).
- Alta potencia específica (por encima de los 200 W/kg).
- Elevada densidad de energía (por encima de los 150 W/l, un 40 por ciento más que la tecnología de níquel-cadmio).
- Tecnología libre de cadmio y por tanto, menos contaminante que la tecnología de níquel-cadmio).

Aunque se han conseguido avances importantes con la tecnología de níquel-hidruro metálico estas baterías presentan ciertas desventajas que han limitado su uso:

- Precio mucho más alto que la tecnología de níquel-cadmio. Las aleaciones metálicas que se emplean para lograr un funcionamiento estable del electrodo negativo, fundamentalmente a temperaturas elevadas, son caras. Actualmente se están utilizando determinadas tierras raras para reducir los costes de fabricación de esta tecnología [20][90][96][112].
- Poca disponibilidad en el mercado actual. No se pueden adquirir con facilidad ya que su producción no es masiva.

- La robustez y la vida cíclica de estas baterías está aún por demostrar. Actualmente, estas baterías se están incorporando en aplicaciones que permitirán sacar conclusiones importantes de su comportamiento.
- Funcionamiento pobre a temperaturas altas debido a la degradación de las características de la aleación metálica del electrodo negativo.
- Alta razón de autodescarga (entre un 15 y un 25 por ciento mensual frente a un 10 por ciento, aproximadamente, en baterías de níquel-cadmio).

Las baterías de níquel-metal hidruro tienen un comportamiento durante la carga aceptable si se le compara con el de otras baterías como las de plomo-ácido [2] [19] [37]. Sin embargo, aunque diversos medios se han aventurado a plantear que estas baterías aceptan con facilidad carga rápida existen dudas razonables sobre la capacidad de esta tecnología para aceptar razones de carga altas [62]; especialmente, si se tiene en cuenta que prácticamente la totalidad de las baterías de níquel-hidruro metálico son selladas y que las reacciones de recombinación de gases tienen una velocidad limitada por lo que no consiguen impedir el aumento de la presión interna en sobrecarga.

Además, las reacciones electroquímicas que ocurren durante la carga son de naturaleza exotérmica provocando un aumento de la temperatura de la batería desde el comienzo de la carga, aún con razones de carga tan bajas como 0,1C. De hecho, existen precedentes de estudios con baterías de níquel-hidruro metálico de capacidad baja (aplicaciones portátiles como telefonía móvil, cámaras digitales o de video, etc.) que demuestran las limitaciones de esta tecnología respecto a la de níquel-cadmio en cuanto a la aplicación de carga rápida, debido fundamentalmente al incremento tan fuerte de la temperatura que experimentan las baterías de níquel-metal hidruro cuando se les aplica regímenes de carga elevados [66] [67] [68].

Esta falta de información precisa y fiable sobre las prestaciones reales de la tecnología de níquel-hidruro metálico en capacidades medias y altas proviene también de su escasa implantación en el mercado (si se compara con la de tecnologías ya establecidas como la de plomo-ácido). El problema es que a pesar de

ser una tecnología con características muy positivas que le permitirían posicionarse en un buen lugar dentro del mercado de baterías para aplicaciones cíclicas, su precio está restringiendo su empleo a aplicaciones que requieren prestaciones elevadas como los vehículos eléctricos.

1.5 OTRAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

1.5.1 Otras tecnologías de baterías que utilizan un electrodo positivo de níquel

Existen varias tecnologías de baterías que mantienen el electrodo positivo de níquel (como las baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico) y que se utilizan en la actualidad en aplicaciones cíclicas de carga-descarga aunque por determinadas razones, ya sea de tipo técnico o de tipo económicas, su uso queda restringido a aplicaciones muy específicas [7] [14].

1.5.1.1 Baterías de níquel-hierro

Las baterías de níquel-hierro (Ni-Fe) se comercializaron durante los primeros años del siglo pasado incluyéndose dentro de sus principales aplicaciones las relacionadas con la tracción eléctrica como, por ejemplo, carretillas elevadoras, locomotoras de minas, pequeños vehículos, etc.

Estas baterías utilizan un electrodo positivo de níquel sumergido en un electrolito de hidróxido de potasio como las baterías de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico. El material activo del electrodo negativo es el hierro. El hierro tiene como material activo características atractivas, fundamentalmente relacionadas con su bajo coste y su alta estabilidad tanto mecánica como electroquímica. La tensión promedio durante la descarga de estas baterías es similar a la que ofrecen las baterías de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico, 1,2 V/celda.

Las desventajas principales de esta tecnología que no han permitido la extensión de uso están relacionadas fundamentalmente con la eficiencia energética tan baja del proceso de carga-descarga debido a la producción temprana de hidrógeno durante

la carga, a diferencia de otras tecnologías donde este proceso ocurre cuando la batería está próxima al estado de plena carga. Las reacciones que provocan el desprendimiento de hidrógeno conducen a un calentamiento excesivo de la batería durante su funcionamiento, lo que hace imprescindible un control térmico más preciso. Además, la producción de hidrógeno produce pérdidas de electrolito con lo que aumenta la necesidad de mantenimiento en esta tecnología de batería.

Otras desventajas que han desplazado del mercado actual a esta tecnología de batería son una razón de autodescarga elevada, un mal funcionamiento a temperaturas bajas y un coste alto.

No obstante, esta tecnología de batería tiene características atractivas que han hecho que su empleo en sistemas de tracción eléctrica sea potencialmente viable; esta consideración ha sido presentada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos [14]. Algunas de las características a destacar de las baterías de níquel-hierro son su alta energía específica, que puede llegar a duplicar la de una batería de plomo-ácido convencional y el elevado número de ciclos de carga-descarga a que pueden ser sometidas, más de 2000 ciclos de carga-descarga con profundidades de descarga del 80 por ciento [7] [20].

1.5.1.2 Baterías de níquel-zinc

Las baterías de níquel-zinc (Ni-Zn) combinan el mismo tipo de electrodo positivo que las baterías de níquel-cadmio y níquel-hierro con un electrodo negativo de zinc; también utilizan una solución acuosa de hidróxido de potasio como electrolito.

Dentro de las características más atractivas de esta tecnología de batería se puede mencionar su tensión promedio más elevada durante la descarga, aproximadamente 1,6 V/celda, manteniendo una curva de tensión de descarga aceptablemente plana durante la mayor parte del proceso de descarga. También destacan por su densidad de energía elevada (por encima de 100 Wh/l), energía específica aceptable (por encima de los 50 Wh/kg) y alta densidad de potencia. Estas baterías exhiben un buen comportamiento a temperaturas bajas y unos precios atractivos [14] [16] [20].

Aunque en determinado momento estas baterías fueron candidatas para sustituir a las baterías de níquel-cadmio del mercado, debido fundamentalmente al inconveniente de la toxicidad del cadmio, nunca llegaron a cumplir con las necesidades exigidas. Las principales desventajas de esta tecnología están relacionadas con una razón de autodescarga elevada y especialmente, con una vida cíclica limitada que no supera los 500 ciclos de carga-descarga. Las causas de una vida cíclica tan corta se relacionan con problemas en el electrodo negativo de zinc: cortocircuitos internos debido al crecimiento de dendritas, cambios estructurales que provocan pérdida en la actividad del material activo y autodescarga elevada por la corrosión de los electrodos [29] [14].

1.5.2 Tendencias futuras: baterías de litio-ion

Además de continuar perfeccionando las tecnologías de baterías existentes para mejorar sus características, se está investigando intensamente en nuevos materiales, más ligeros y que permitan mayores densidades de energía. Las baterías de litio-ion (Li-ion) son una muestra de estos esfuerzos [37] y ya se han introducido con éxito en aplicaciones donde se requieren capacidades bajas. Por el momento, se está intentando adaptarlas a las aplicaciones donde se requieren capacidades medias y altas interconectando celdas en paralelo para aumentar la capacidad de las baterías. De ahí que sea necesario un periodo de prueba que permita evaluar los índices de comportamiento de esta tecnología bajo las condiciones típicas de funcionamiento de las baterías de media y gran capacidad en aplicaciones cíclicas [30].

A partir de los datos recogidos en la literatura, que se basan en las características teóricas que se pueden alcanzar con esta combinación química o bien provienen de los resultados obtenidos con prototipos, las ventajas principales de las baterías de litio-ion son:

- La tensión por celda más alta (4 V/celda) de todas las tecnologías revisadas en este trabajo).

- Elevada energía específica (por encima de los 140 Wh/kg) gracias a que el litio es un metal muy ligero.
- Alta potencia específica (entorno a los 420 W/kg).
- Elevada densidad de energía (por encima de los 290 Wh/l).

Los problemas principales asociados con las baterías de litio-ion son:

- Problemas de ecualización debido a que las capacidades más altas se obtienen interconectando celdas en paralelo.
- Baja resistencia a abusos tanto eléctricos como mecánicos siendo muy vulnerables a las sobrecargas y sobredescargas.
- Problemas de aceptación de carga rápida.
- Necesidad de un control muy preciso de la tensión de celda ya que si se supera el valor límite se pueden producir daños irreparables en la batería.
- Disponibilidad prácticamente nula y precios iniciales muy altos que disminuirían en los próximos años con el aumento de la producción. Actualmente, esta tecnología para capacidades medias y altas se encuentra en fase de desarrollo y pruebas de prototipos lo que hace que su producción sea muy limitada; de ahí su escasa disponibilidad y las estimaciones de precio tan altas.

Dado que los problemas que presenta la tecnología de litio-ion para capacidades medias y altas (y que hoy en día limitan su uso) se están estudiando y aparecen nuevas soluciones, se prevé que estas baterías tendrán de acuerdo a sus prestaciones un futuro determinante en aplicaciones cíclicas de media y gran capacidad. Por tanto, pueden considerarse como una promesa futura de acuerdo al comportamiento alcanzado por las baterías de litio-ion de capacidad baja usadas en telefonía móvil, cámaras de video, cámaras digitales, ordenadores portátiles, etc.

1.6 COMPARACIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS ÓPTIMAS PARA LA APLICACIÓN DE CARGA RÁPIDA

Para seleccionar las tecnologías de baterías más adecuadas para aplicaciones donde se requiera carga rápida, es importante realizar un exhaustivo análisis comparativo de las principales tecnologías de baterías estudiadas en las secciones anteriores (plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico y litio-ion).

El análisis se centra fundamentalmente, en las principales características de funcionamiento de las diferentes tecnologías bajo regímenes cíclicos de carga-descarga.

En la tabla 1-1 se resumen algunas de estas características como son: tensión nominal por celda, energía específica, potencia específica, densidad de energía, razón de autodescarga, vida cíclica y coste.

Índice		Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Tensión nominal	(V/celda)	2,0	1,2	1,2	4,0
Energía específica	(Wh/kg)	40	60	90	140
Potencia específica	(W/kg)	150-300	80-150	200-300	420
Densidad de energía	(Wh/l)	80	95	150	290
Autodescarga	(%/mes)	4-6	10	15-25	2
Vida Cíclica	(ciclos)	500-600	>1500	>1200	-
Coste	(€/kWh)	120-150	250-350	300-450	-

Tabla 1-1. Resumen de las principales características de las baterías más utilizadas en sistemas de tracción eléctrica.

Como se puede apreciar en la tabla resumen 1-1:

- **Tecnología de litio-ion**

La tecnología de litio-ion es por el momento la tecnología de baterías más prometedora [73]. Con esta tecnología se han logrado valores de energía específica, potencia específica y densidad de energía muy por encima del resto de tecnologías aunque hay que destacar que estos datos provienen de estimaciones teóricas y de los resultados obtenidos con prototipos que se encuentran bajo pruebas [33]. La disponibilidad de estas baterías en estos momentos es muy baja y solo aparecen en aplicaciones muy concretas como, por ejemplo, en varios prototipos de vehículos eléctricos [28]. Otro parámetro muy importante es la tensión nominal de 4 V/celda (el doble de la exhibida por las baterías de plomo-ácido y más de tres veces la ofrecida por las tecnologías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico); esto reduce el

número de celdas necesarias para lograr la tensión deseada en una aplicación determinada.

A pesar de que los investigadores mejoran cada día las deficiencias de las baterías de litio-ion de media y gran capacidad tratando de hacerlas más robustas y resistentes tanto a esfuerzos eléctricos como mecánicos, su posible implantación en el mercado depende de la fiabilidad que esta tecnología demuestre en las pruebas a que se está sometiendo en la actualidad existiendo dudas sobre su vida útil.

El precio de estas baterías tampoco se puede determinar con precisión pues su comercialización a gran escala es nula. Aunque actualmente las estimaciones dan precios altos, es probable que éstos puedan bajar con rapidez si se realiza una producción a gran escala de este tipo de batería.

- ***Tecnologías de níquel-cadmio y de níquel-metal hidruro***

Las tecnologías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico son bastante parecidas aún cuando las baterías de níquel-hidruro metálico aventajan a las baterías de níquel-cadmio en los índices relacionados con la energía específica y la densidad de energía; así se pueden obtener con la tecnología de níquel-hidruro metálico baterías de menor peso y volumen. No obstante, las baterías de níquel-hidruro metálico son mucho más caras y no aparecen con facilidad en el mercado debido a que su producción a gran escala aún no es una realidad como ocurre con las baterías de níquel-cadmio [52].

Además, la robustez de las baterías de níquel-cadmio y su vida útil prolongada son todavía notas pendientes para las baterías de níquel-hidruro metálico. No obstante, cada vez se valora más que las baterías estén libres de elementos contaminantes y la tecnología de níquel-cadmio no cumple este requerimiento al ser el cadmio un elemento muy peligroso para el medio ambiente. De todos modos, hay que destacar que el proceso de reciclado de las baterías de níquel-cadmio es un problema para el que existen soluciones (plantas especiales de reciclado) y se continúa trabajando fundamentalmente, en políticas (por parte de los gobiernos y los fabricantes de baterías) que organicen la gestión de distribución y devolución de las baterías una

vez que ha finalizado su vida útil. De cualquier manera es importante destacar que ninguna batería se puede considerar como ecológica totalmente ya que incluyen elementos más o menos peligrosos que requieren su reciclado [115].

El liderazgo de las baterías de níquel-cadmio queda de manifiesto en aplicaciones donde una batería de media/gran capacidad se ve sometida a ciclos repetidos de carga-descarga y donde es importante la posibilidad de una recarga rápida. Después de estudiar el mercado potencial de baterías de media y gran capacidad donde se necesita emplear carga rápida, se ha llegado a la conclusión de que las necesidades fundamentales se centran en el campo de los vehículos eléctricos convencionales y de los vehículos eléctricos de uso industrial [9] [11]. En el primer caso, se pueden utilizar baterías de capacidad más pequeña (menor peso y volumen) considerando que aunque la autonomía que brindan es más baja, se puedan cargar en un tiempo reducido (mediante carga rápida) y por tanto, se puedan usar con más frecuencia incrementándose la autonomía efectiva. En el segundo caso, se puede disponer de un número menor de grupos de baterías de repuesto y por tanto, lograr un uso más eficiente de la capacidad que puede entregar la batería (mayor capacidad de batería, más costes). La utilización de la carga rápida permite no sobredimensionar la capacidad necesaria a la hora de calcular el banco de baterías para una aplicación en particular.

- ***Tecnologías de plomo-ácido***

Las tecnologías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico aventajan claramente a la tecnología de plomo-ácido en aplicaciones cíclicas ya que estas baterías no están preparadas para resistir repetidos ciclos de carga-descarga con descargas profundas [39] [40] ni recargas a altas razones de corriente. Además, las baterías de plomo-ácido requieren labores importantes de mantenimiento asociadas a las pérdidas de electrolito y la corrosión de los elementos que las componen.

Por tanto:

1º) A pesar de que las baterías de plomo-ácido se continúan utilizando en determinadas aplicaciones cíclicas por su bajo coste, no son una buena opción si la

aplicación requiere repetidos ciclos de carga-descarga con descargas profundas y/o la aplicación de carga rápida. Por este motivo, esta tecnología no será objeto de análisis en este trabajo [1].

2º) La tecnología de litio-ion es aún muy novedosa en baterías de media y gran capacidad y se encuentra en fase de prueba en aplicaciones muy específicas llevadas a cabo fundamentalmente por los propios fabricantes. Actualmente, estas baterías no tienen definido su precio y no se encuentran en el mercado. Esto ha impedido su inclusión en los estudios realizados en este trabajo.

3º) En este momento, las tecnologías que más prestaciones están ofreciendo de forma fiable en sistemas que funcionan bajo regímenes cíclicos de carga-descarga son las tecnologías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico [25] [26]. Por este motivo y dada la creciente importancia que adquiere la posibilidad de recargar estas baterías en el menor tiempo posible se ha realizado el estudio del comportamiento de estas baterías bajo regímenes cíclicos de carga-descarga, haciendo énfasis en los procesos de carga rápida.

1.6.1 Baterías seleccionadas para los ensayos

La aplicación por excelencia donde la batería tiene que funcionar bajo repetidos ciclos de carga-descarga con descargas profundas y además, donde es más necesaria la carga rápida es la tracción eléctrica [9] [32] [38]. Una batería para aplicaciones de tracción debe cumplir los siguientes requisitos: densidad de energía y energía específica altas para disminuir el volumen y peso, potencia específica alta, vida útil elevada bajo regímenes cíclicos de carga-descarga, resistencia a razones de descarga altas para dar respuesta a las demandas de la aplicación y posibilidad de aplicación de razones de carga altas para disminuir los tiempos de recarga. Por este motivo, las baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico que se han utilizado para realizar los ensayos de laboratorio con el objetivo de estudiar su comportamiento, fundamentalmente ante procesos de carga rápida, han sido baterías de tracción; estas baterías están presentes en gran parte de los sistemas de tracción eléctrica y en particular, en numerosos vehículos eléctricos que actualmente están implantados en Europa [51] [52] [102]. Algunos ejemplos de

vehículos eléctricos que utilizan estas baterías son: Peugeot 106, Citroen AX, Citroen Saxo, Renault Clio, Renault Express, etc.

Las baterías escogidas para realizar este trabajo de investigación se describen a continuación:

- Baterías de níquel-cadmio

Las baterías de níquel-cadmio utilizadas en el estudio de carga rápida son módulos compuestos por 5 celdas de 1,2 V/celda de tensión nominal (6 V/módulo). Estos módulos son abiertos, aunque poseen válvulas de seguridad para evitar derrames o la propia contaminación del electrolito. Las válvulas de seguridad permiten la expulsión de gas a partir de una presión baja (aproximadamente 0,15 bares). El margen de temperaturas de funcionamiento se extiende desde -20 °C hasta 40 °C. En la figura 1-5 se puede observar uno de los módulos utilizados para estudiar el comportamiento de esta tecnología de batería y en la tabla 1-2 se resumen los principales datos técnicos ofrecidos por el fabricante.



Figura 1-5. Baterías de Ni-Cd estudiadas en el laboratorio.

MODELO / FABRICANTE	STM 5.100 / SAFT
---------------------	------------------

TENSIÓN NOMINAL	6,0 V
CAPACIDAD NOMINAL*	100 Ah
ENERGÍA ESPECÍFICA *	55 Wh/kg
DENSIDAD DE ENERGÍA *	88 Wh/dm ³
POTENCIA ESPECÍFICA **	122 W/kg
DENSIDAD DE POTENCIA	203 W/l
PESO	12,9 kg
DIMENSIONES	(248 × 120 × 260) mm
VOLUMEN	7,74 dm ³
CICLOS DE CARGA-DESCARGA **	>2000

* utilizando una razón de descarga de 0,2C ** con un 80% de profundidad de la descarga

Tabla 1-2. Datos técnicos de las baterías de Ni-Cd estudiadas en el laboratorio.

- Baterías de níquel-hidruro metálico

Las baterías de níquel-hidruro metálico utilizadas en este trabajo son módulos compuestos por 10 celdas cada uno y tienen una tensión nominal 12 V/módulo (1,2 V/celda). Estas baterías según los datos del fabricante son selladas. No obstante, la válvula de seguridad permite la fuga de gas cuando se supera una presión determinada. La detección de hidrógeno cuando la batería se carga utilizando una razón de carga baja (0,1C) se produce cuando la batería alcanza su estado de plena carga por lo que se puede deducir que prácticamente estas baterías se comportan en cuanto a la expulsión de gas como las de níquel-cadmio [87].

El margen de temperaturas de funcionamiento de estas baterías se extiende desde -10 °C a 45 °C durante la carga y entre -10 °C y 60 °C durante la descarga.

La figura 1-6 muestra algunos módulos de níquel-hidruro metálico como los utilizados en el estudio de comportamiento en carga realizado en este trabajo. Los datos técnicos ofrecidos por el fabricante se pueden observar en la tabla 1-3. Estas baterías aún no se producen a gran escala como las baterías de níquel-cadmio pero se estima un crecimiento acelerado en los próximos años. Este crecimiento dependerá de los resultados que se obtengan de su comportamiento en las aplicaciones donde se está utilizando. Al igual que en el caso de las baterías de níquel-cadmio, las baterías de níquel-hidruro metálico se están empleando fundamentalmente en sistemas de tracción eléctrica y específicamente en vehículos eléctricos.



Figura 1-6. Baterías de Ni-MH utilizadas en los ensayos de laboratorio.

MODELO / FABRICANTE	NH 12.4 / SAFT
TENSIÓN NOMINAL	12,0 V
CAPACIDAD NOMINAL*	100 Ah
ENERGÍA ESPECÍFICA *	69 Wh/kg
DENSIDAD DE ENERGÍA *	145 Wh/dm ³
POTENCIA ESPECÍFICA **	160 W/kg
DENSIDAD DE POTENCIA	332 W/l
PESO	18,6 kg

DIMENSIONES	(390 × 120 × 195) mm
VOLUMEN	8,8 dm ³
CICLOS DE CARGA-DESCARGA **	>1200

* utilizando una razón de descarga de 0,3C ** con un 80% de profundidad de la descarga

Tabla 1-3. Datos técnicos de las baterías de Ni-MH estudiadas en el laboratorio.

1.7 ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS FUTURAS DE LA CARGA DE BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD PARA APLICACIONES CÍCLICAS

En las secciones anteriores se han descrito las características tanto desde el punto de vista estructural como funcional de las principales tecnologías de baterías utilizadas en aplicaciones cíclicas de carga-descarga. Dentro de todas las características se han destacado aquellas que mayor influencia pueden tener a la hora de escoger una u otra tecnología para una determinada aplicación. En este sentido se han mencionado características muy deseadas como alta densidad de energía, alta potencia específica, larga vida cíclica, etc.

Una vez que se escoge la tecnología de batería que se ajusta a los requerimientos de una aplicación específica es necesario asegurar unas condiciones óptimas de trabajo para evitar una degradación acelerada de las características de la batería escogida.

Las condiciones en que se realiza la descarga de la batería dependen directamente de la carga externa que tenga conectada y de las condiciones medioambientales del sitio donde se encuentre funcionando. Aunque durante la descarga se pueden realizar acciones de control para evitar que se superen determinados límites de funcionamiento, el proceso queda supeditado fundamentalmente a la carga externa que tenga conectada la batería entre sus terminales. El comportamiento de las cargas eléctricas externas a la batería puede ser extremadamente variable en una u

otra aplicación donde se utiliza un mismo tipo de batería y esto marca sensiblemente el comportamiento de la batería a lo largo de toda su vida de servicio.

Por el contrario, la recarga de la batería (aplicaciones cíclicas de carga-descarga) es un proceso que puede ser totalmente controlado con el objetivo de lograr una condiciones óptimas que permitan preservar las características de la batería y evitar su deterioro acelerado. Por este motivo, cada día adquieren más importancia los métodos a través de los cuales se realiza la recarga de las baterías.

1.7.1 Métodos de carga utilizados en baterías para aplicaciones cíclicas

Existen diferentes métodos para realizar la carga de una batería de media y gran capacidad y éstos se pueden clasificar en función de la forma en que puede variar la tensión o la corriente durante el proceso de carga o en función del tiempo que se requiere para realizar la recarga de la batería.

- Métodos de carga en función de las características de la tensión y la corriente que se utilizan para realizar la carga.

En cuanto a las características de la tensión y de la corriente que se utilizan para recargar una batería, los métodos de carga se pueden clasificar básicamente en carga a tensión constante y carga a corriente constante.

La carga a tensión constante es poco usual en este tipo de aplicaciones (regímenes cíclicos) ya que presenta inconvenientes serios relacionados con el aumento de la temperatura. El incremento de la temperatura produce una disminución de la resistencia interna de la batería y por tanto, un aumento de la corriente de carga. El incremento de la corriente de carga genera a su vez un aumento de la producción de calor debido al efecto Joule y éste un nuevo decrecimiento de la resistencia interna dando lugar a un fenómeno comúnmente conocido como “carrera térmica”.

Además, cuando la batería se encuentra en estado de descarga total y se inicia una carga a tensión constante la corriente inicial de carga puede ser muy elevada debido a la diferencia de potencial entre la tensión de la fuente de carga y la tensión de la

batería. En estos casos se limita la corriente al inicio del proceso de carga resultando en una carga con dos etapas, la primera etapa a corriente constante y la segunda etapa a tensión constante.

Otro inconveniente de la carga a tensión constante es la imposibilidad de conseguir tiempos de carga reducidos ya que la corriente de carga disminuye a medida que la batería incrementa su estado de carga. En la figura 1-7a se puede observar la evolución típica de la corriente durante una carga a tensión constante.

Debido a los inconvenientes mencionados la carga de las baterías que funcionan en regímenes cíclicos de carga-descarga se realiza generalmente a corriente constante. Las baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico tienen una buena aceptación de carga cuando se cargan a corriente constante. Este método de carga permite el cálculo directo de la capacidad lo que resulta útil cuando se desea conocer el balance de capacidad tanto cargada como descargada de la batería con el objetivo de estimar su estado de carga.

Además, mediante la carga a corriente constante se puede reducir drásticamente el tiempo de carga ya que a diferencia de la carga a tensión constante la corriente no se reduce a medida que se incrementa el estado de carga de la batería. La figura 1-7b muestra la evolución típica de la tensión de la batería para una carga a corriente constante.

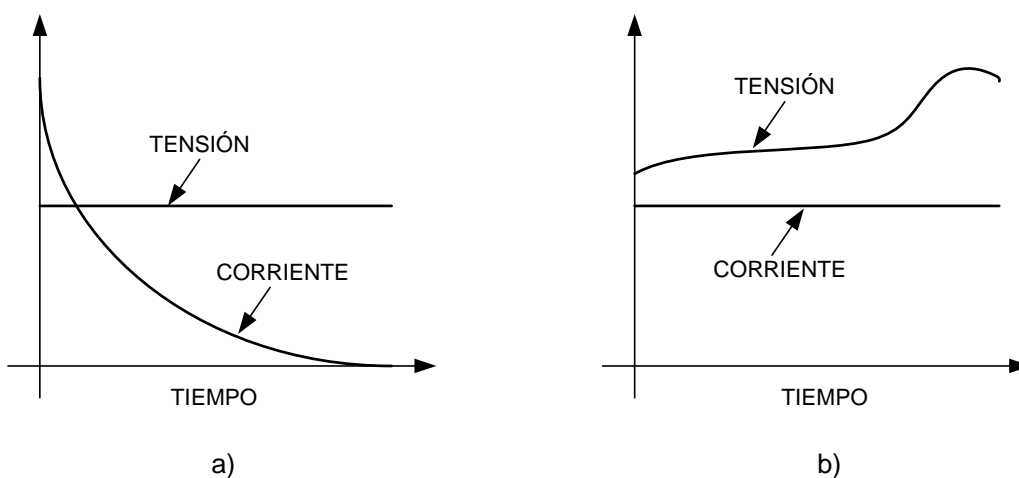


Figura 1-7. Formas de onda típicas durante la carga de una batería: a) carga a tensión constante b) carga a corriente constante.

- Métodos de carga en función del tiempo que se necesita para realizar la carga.

En función del tiempo en que se realiza la carga de la batería existen básicamente dos métodos de carga: carga lenta o convencional (método de carga tradicional) y carga rápida (método acelerado de carga).

Muchos especialistas plantean que a menos que sea necesario otro tipo de carga es aconsejable realizar una carga lenta. Generalmente se utiliza como carga lenta una razón de carga de 0,1C y el tiempo necesario para alcanzar la plena carga se sitúa por encima de las 10 horas debido a que la eficiencia del proceso no es del 100 por ciento. Es decir, siempre que el tiempo de recarga no sea un factor apremiante y no se dispongan de sistemas de control de la carga, es conveniente evitar los problemas derivados de la carga rápida.

No obstante, en la actualidad se están desarrollando áreas de aplicación en las que el tiempo de recarga es un factor determinante [13] [24] [35]; los vehículos eléctricos, la aviación y los sistemas de comunicaciones son algunos ejemplos de estas exigencias. Utilizando técnicas de carga rápida se puede reducir el tiempo de carga por debajo de las tres horas, y con medidas adecuadas de control y seguridad se puede conseguir la carga de un tanto por ciento elevado de la capacidad nominal de la batería en menos de una hora [22].

La selección de una razón de carga adecuada para realizar la recarga de la batería es muy importante ya que garantiza el máximo rendimiento de la batería y una vida útil prolongada pero requiere de un conocimiento previo del comportamiento de la batería.

En este trabajo se realiza un estudio detallado del comportamiento de las baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico de media y gran capacidad bajo razones de carga, desde carga lenta hasta carga rápida y bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

Además, el conocimiento del comportamiento de la batería ante procesos de carga deriva en la obtención métodos de control más eficientes y fiables que garantizan el correcto funcionamiento de la batería. De esta forma se evitan los riesgos asociados con los procesos de carga rápida y se puede aprovechar todo el tiempo de vida cíclica para el que fue diseñada la batería.

Cada unos de estos métodos está estrechamente relacionado con la evolución de las principales variables que intervienen en el proceso de carga: la tensión y la temperatura de la batería, y la generación de gases en su interior. La evolución de estas variables permite determinar con menor o mayor precisión el instante adecuado para la finalización de la carga o el cambio a otra razón de carga admisible por la batería sin peligro de un deterioro acelerado.

Los resultados del estudio realizado pueden servir de base en el diseño de cargadores rápidos para baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico de media y gran capacidad.

CAPÍTULO

2

**CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE
DESCARGA DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE
Ni-MH**

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE DESCARGA DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH

2.1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento de las baterías durante la descarga es esencial para determinar su respuesta ante una aplicación específica. Además, antes de analizar cualquier fenómeno asociado a un proceso de carga es importante conocer la influencia de las condiciones en que se realiza la descarga sobre un ciclo completo de carga-descarga. De esta forma, al analizar los resultados de los ensayos realizados para el estudio de los procesos de carga se pueden separar los efectos asociados a la descarga del comportamiento de la batería durante la carga.

Aunque existe información suficiente sobre las características de descarga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de baja capacidad (se han realizado estudios [104] y existe una amplia experiencia que proviene del uso extensivo de estas baterías en aplicaciones portátiles como telefonía móvil, ordenadores portátiles, cámaras digitales, herramientas portátiles, etc.) no ocurre lo mismo con las baterías de media y gran capacidad. En principio, el comportamiento esperado sería similar debido a que las reacciones químicas que tienen lugar son esencialmente las mismas; independientemente de la forma constructiva de las baterías, las reacciones básicas que tiene lugar durante la descarga son las expuestas en los apartados 1.4.2 y 1.4.3 del capítulo 1. No obstante, debido a que en los procesos de descarga en baterías de media y gran capacidad se manejan potencias elevadas, se producen fenómenos de calentamiento y pérdidas más notables que en el caso de baterías de baja capacidad. Estos fenómenos determinan el grado de aprovechamiento de la capacidad almacenada en la batería.

Además, hay que destacar la falta de información precisa y fiable sobre el comportamiento en descarga de baterías de media y gran capacidad pertenecientes a tecnologías avanzadas como Ni-Cd y Ni-MH (éstas últimas en producción a pequeña escala y aún bajo desarrollo).

Por todo ello, en este capítulo se analizan las características de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH en descarga. Estas características se relacionan, fundamentalmente, con la evolución de la tensión y de la temperatura en la batería, y con su capacidad para suministrar energía eléctrica a un circuito externo. El perfil de la curva de descarga y el valor de la capacidad suministrada durante la descarga son función fundamentalmente de la razón de descarga (magnitud de la corriente drenada de la batería), de la temperatura de funcionamiento y del grado de envejecimiento de la batería [7] [15] [20] [91].

2.2 EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN Y DE LA TEMPERATURA EN LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH DURANTE LA DESCARGA

2.2.1 Circuito equivalente de las baterías

La tensión de celda de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH durante la descarga es muy similar, siendo en ambos casos la tensión nominal de 1,2 V/celda. Esta característica permite sustituir en las aplicaciones una tecnología por otra sin mayores complicaciones si así se desea.

La figura 2-1 muestra la evolución típica de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd o de Ni-MH cuando se descarga a corriente constante. En los apartados siguientes de este capítulo se precisan las diferencias entre una y otra tecnología. Como se puede apreciar en la figura 2-1, después de un transitorio inicial la celda proporciona una tensión bastante invariable hasta casi el final de la descarga. Esta zona donde la tensión se mantiene aproximadamente constante se denomina “planicie de tensión” o “meseta de tensión”.

Para describir el comportamiento de la tensión de una batería durante la descarga se suele utilizar el circuito equivalente que se muestra en la figura 2-2. Este circuito permite estimar la tensión real en los terminales de una batería durante la descarga a partir de la tensión de circuito abierto o tensión de vacío (E_o) y de una serie de elementos (R_h , R_d y C_p) que se describen a continuación [91].

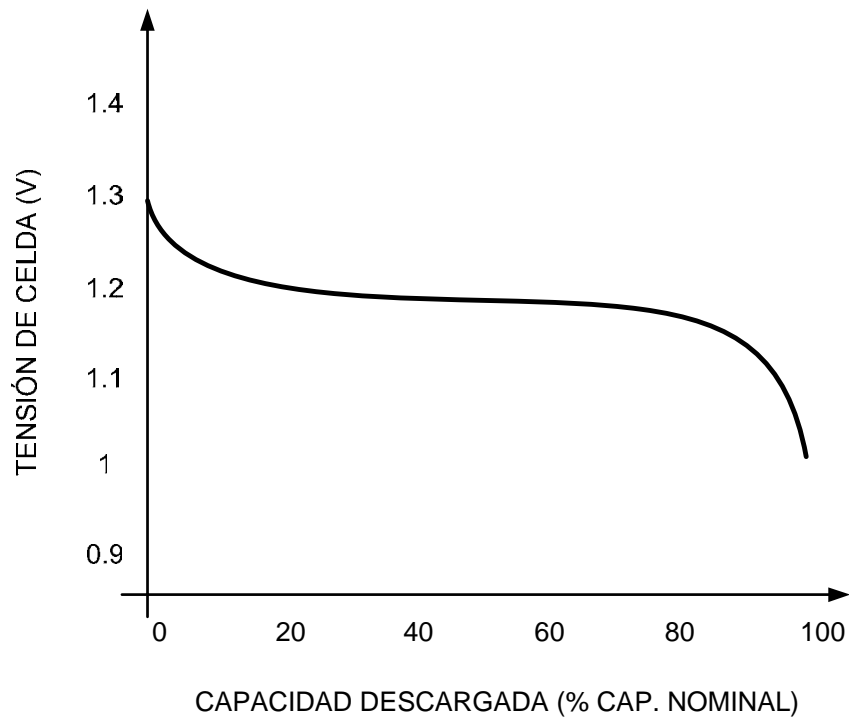


Figura 2-1. Evolución típica de la tensión de celda durante la descarga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH.

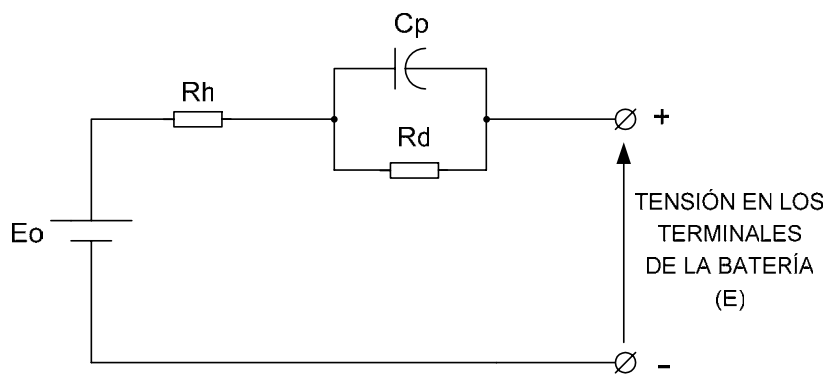


Figura 2-2. Circuito equivalente de una batería durante la descarga.

Los parámetros que aparecen en el circuito equivalente de la figura 2-2 se denominan:

E_o Tensión de la batería en vacío

R_h Resistencia instantánea

R_d Resistencia retardada

C_p Condensador equivalente

E Tensión de la batería cuando circula una corriente entre sus terminales

También se utiliza como parte del modelo el siguiente parámetro:

R_e Resistencia interna equivalente ($R_h + R_d$)

La tensión de vacío (E_o), como ya se comentó de forma más extensa en el apartado 1.3.2 es la tensión entre los terminales de la batería cuando no circula corriente entre ellos.

Aunque el valor de E_o viene fijado básicamente por la diferencia de potencial entre los electrodos de las celdas, no es un valor constante sino que varía en función del estado de descarga, de la temperatura y del grado de envejecimiento de la batería.

Las resistencias (R_h y R_d) y el condensador (C_p) no son elementos que formen parte físicamente de la batería, sin embargo permiten modelar su comportamiento ya que su efecto sobre la tensión (E) del circuito emula la evolución de la tensión de la batería durante la descarga. El valor de estos elementos, como el de la tensión de vacío, no es constante sino que depende del estado de descarga, de la temperatura y del grado de envejecimiento de la batería.

En gran parte de las aplicaciones, el régimen transitorio que se produce desde el comienzo de la descarga hasta alcanzar el régimen permanente se puede despreciar ya que su duración representa una parte pequeña del tiempo de descarga continuada total. En el circuito equivalente de la figura 2-2 el efecto del régimen transitorio se consigue a través de la constante de tiempo (T_d) que introduce el condensador C_p y la resistencia R_d , tal y como se observa en la ecuación 2-1:

$$T_d = R_d \cdot C_p \quad (2-1)$$

La combinación de la resistencia R_d y la capacidad C_p aporta una constante de tiempo de aproximadamente un 3 por ciento del tiempo de descarga total, variando

ligeramente en función de la temperatura y la razón de descarga aplicada: T_d disminuye con el incremento de la razón de descarga y con el incremento de la temperatura [20].

Cuando el tiempo que dura la descarga es muy pequeño, por ejemplo en aplicaciones de régimen intermitente, el tiempo del transitorio supera el tiempo de la descarga. En estos casos se puede despreciar la constante de tiempo que introduce la ecuación 2-1 y la tensión en los terminales de la batería se puede expresar según la ecuación 2-2:

$$E = E_o - I_d \cdot R_h \quad (2-2)$$

donde el valor de la resistencia instantánea (R_h) representa entre un 25 y un 75 por ciento de la resistencia interna equivalente (R_e), dependiendo básicamente de las características de diseño de la batería, y donde (I_d) es la corriente de descarga aplicada.

En descargas continuadas, cuando la batería comienza a descargarse la tensión en sus terminales cae inmediatamente desde su valor de vacío a un valor determinado por la resistencia instantánea (R_h) y por la corriente de descarga. Después del transitorio inicial la tensión de la batería viene impuesta por la corriente de descarga y por la resistencia interna equivalente (R_e).

Por tanto, la tensión de descarga en régimen permanente se puede calcular utilizando la ecuación 2-3:

$$E = E_o - I_d \cdot R_e \quad (2-3)$$

El efecto que producen los diferentes elementos del circuito equivalente sobre la tensión de una batería durante la descarga se puede apreciar de forma gráfica en la figura 2-3.

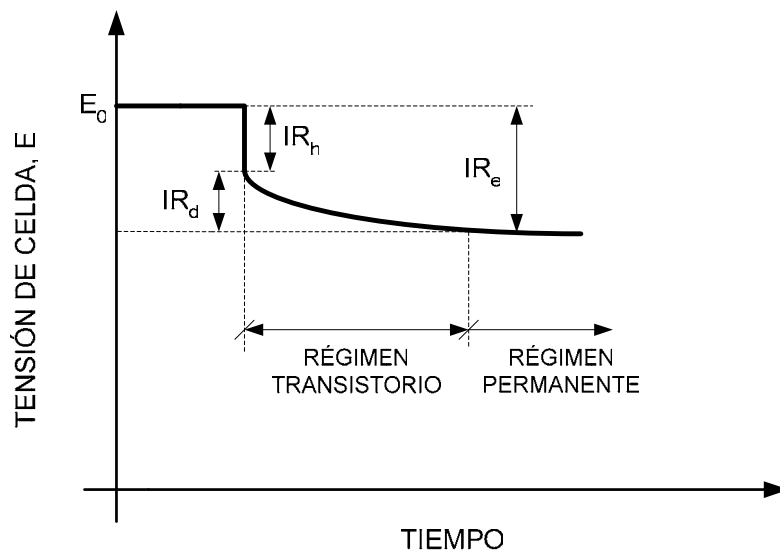


Figura 2-3. Evolución de la tensión en los terminales de la batería al comienzo de una descarga.

Los valores de la tensión de vacío y de la resistencia interna equivalente de la batería varían en función de determinadas variables como el estado de descarga, la temperatura y el grado de envejecimiento de la batería. Por tanto, a continuación se analizará la influencia de estas variables en la tensión de vacío y en la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH.

2.2.1.1 Variables que influyen sobre la tensión de vacío

Los valores de la tensión de vacío de una batería varían en función del estado de descarga, la temperatura y el grado de envejecimiento de la batería.

Para la obtención de las curvas de evolución de la tensión de vacío:

- Se sometió a las baterías a descargas intermitentes de 10 minutos a corriente constante y usando una razón de descarga de 0,2C.
- Se establecieron entre las descargas periodos de reposo de una hora, tiempo suficiente para que se recuperen las condiciones de vacío, realizándose al final de dichos periodos las medidas de tensión que se muestran en la curva.

Una vez que se detiene la descarga la tensión evoluciona lentamente hasta que se estabiliza.

- Se finalizó la toma de medidas cuando la tensión de las baterías durante la descarga alcanzó la tensión normalizada de 1 V/celda.

2.2.1.1.1 Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la tensión de vacío de las baterías de Ni-Cd

a) Influencia del estado de descarga

La tensión de vacío de una batería de Ni-Cd decrece durante el proceso de descarga en función de la capacidad descargada. La figura 2-4 muestra el efecto que el grado de descarga tiene sobre la tensión de vacío en las baterías de Ni-Cd a temperatura ambiente de 23°C.

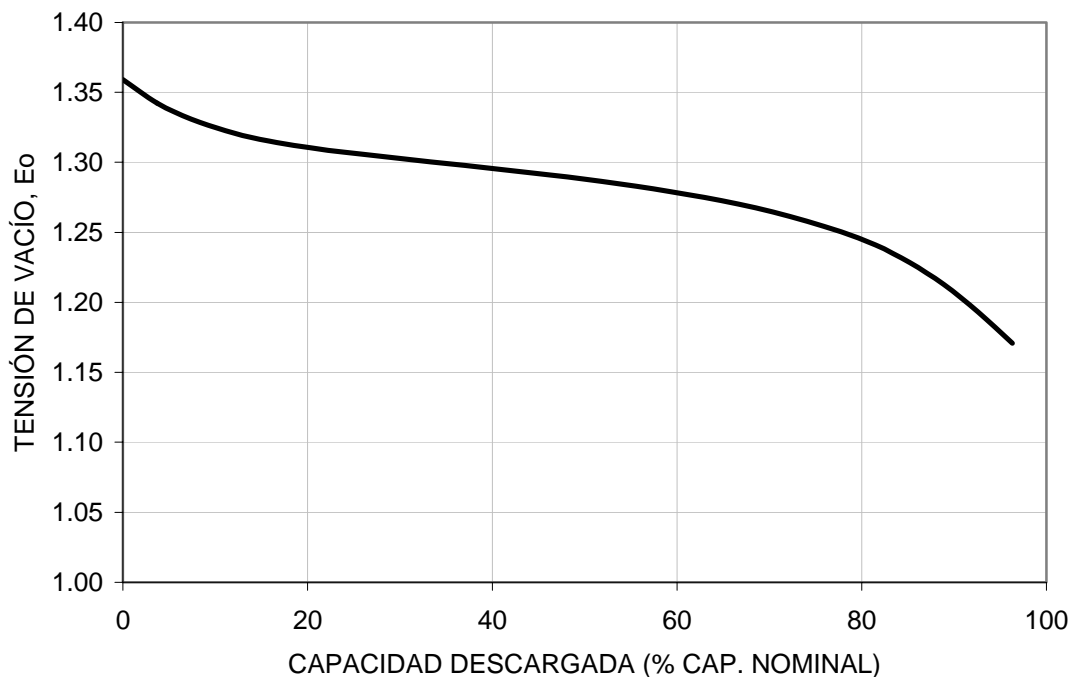


Figura 2-4. Evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-Cd en función del estado de descarga y a temperatura ambiente de 23 °C.

Los resultados obtenidos muestran que:

- La caída de tensión que se produce desde plena carga hasta que la batería se descarga totalmente es de aproximadamente 180 mV/celda.
- Los cambios más pronunciados de la curva de tensión de vacío se producen al comienzo de la descarga (hasta un 20 por ciento de capacidad descargada) y al final de la misma (después de que la batería se ha descargado un 80 por ciento de su capacidad nominal). La variación global en estas zonas es de 120 mV/celda (dos terceras partes de la variación sufrida durante la descarga completa).
- Entre el 20 y el 80 por ciento de capacidad descargada la tensión de vacío decrece aproximadamente 60 mV/celda (una tercera parte de la variación sufrida durante la descarga completa) lo cual muestra que estas baterías exhiben una característica de tensión bastante plana durante la mayor parte de la descarga.

b) Influencia de la temperatura

Para comprobar en qué medida influye la temperatura en la tensión de vacío de una batería se repitieron las medidas realizadas para 23 °C en el margen de temperaturas entre 5 °C y 33 °C.

La figura 2-5 muestra la evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-Cd en función del estado de descarga y de la temperatura. De los resultados obtenidos se deduce que:

- Durante la mayor parte del proceso de descarga, entre el 20 y el 80 por ciento de capacidad descargada, la tensión de vacío no varía prácticamente con la temperatura en el margen estudiado.
- En la zona inicial de descarga (hasta el 20 por ciento de capacidad descargada) la tensión de vacío es más elevada a temperaturas bajas (5°C). A plena carga la diferencia es máxima (17 mV/celda entra la descarga realizada a 5 °C y la realizada a 23 °C); a partir del 20 por ciento de

capacidad descargada las tensiones se van aproximando hasta prácticamente igualarse.

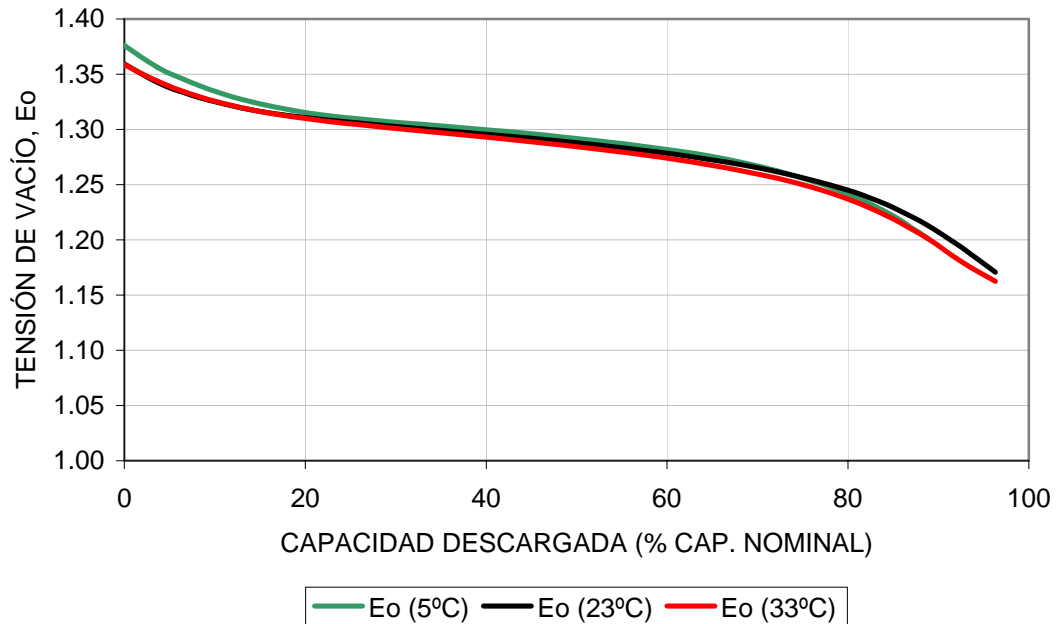


Figura 2-5. Evolución de la tensión de vacío (E_o) de las baterías de Ni-Cd en función del estado de descarga y de la temperatura.

2.2.1.1.2 Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la tensión de vacío de las baterías de Ni-MH

a) Influencia del estado de descarga

El mismo estudio sobre la tensión de vacío realizado para las baterías de Ni-Cd se llevó a cabo para las baterías de Ni-MH. La figura 2-6 muestra la evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-MH en función del estado de descarga y a temperatura ambiente de 23 °C. Según se puede observar:

- La variación total de la tensión de vacío (desde plena carga hasta la descarga completa de la batería) es de aproximadamente 230 mV/celda (50 mV/celda por encima de la variación observada en Ni-Cd).
- Al igual que en el caso de las baterías de Ni-Cd las mayores variaciones en la tensión de vacío se producen al inicio (hasta un 20 por ciento) y al final de

la descarga (por encima de un 60 por ciento). La variación global en estas zonas es de 215 mV/celda (el 93 por ciento de la variación sufrida durante la descarga completa).

- La variación de la tensión de vacío cuando la capacidad descargada está entre un 20 y un 60 por ciento de la capacidad nominal de la batería es de 15 mV/celda, lo que representa sólo un 7 por ciento de la variación total, mostrando una zona de tensión prácticamente invariable.

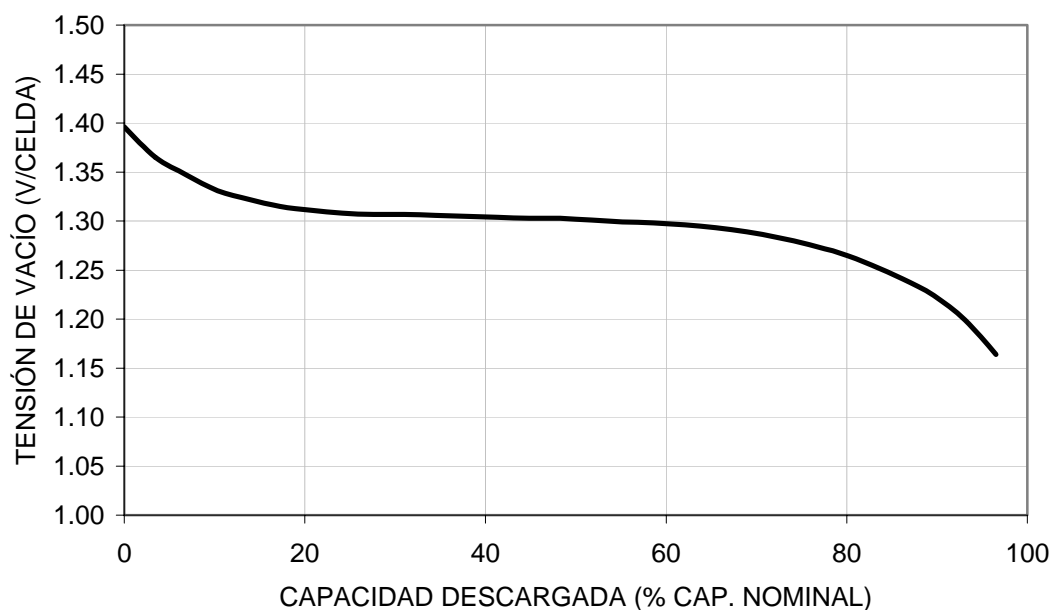


Figura 2-6. Evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-MH en función del estado de descarga y a temperatura ambiente de 23 °C.

b) Influencia de la temperatura

Las baterías de Ni-MH se sometieron a descargas intermitentes a diferentes temperaturas para comprobar el efecto de esta variable sobre la tensión de vacío, de la misma forma que se realizó en la tecnología de Ni-Cd.

La figura 2-7 muestra la evolución de la tensión de vacío de las baterías de Ni-MH en función del estado de descarga y de la temperatura. Como se puede apreciar, no

existen variaciones significativas en la tensión de vacío cuando la temperatura varía entre 5 °C y 33 °C.

En la figura 2-8 se compara la evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH. Como se puede apreciar y según el análisis realizado en cada caso, la evolución de la tensión de vacío en las baterías de Ni-MH es mucho más plana que la de Ni-Cd cuando la capacidad descargada está entre el 20 y el 60 por ciento de la capacidad nominal. Sin embargo, a partir del 60 por ciento la tensión de vacío decrece más rápido en las baterías de Ni-MH que en las de Ni-Cd.

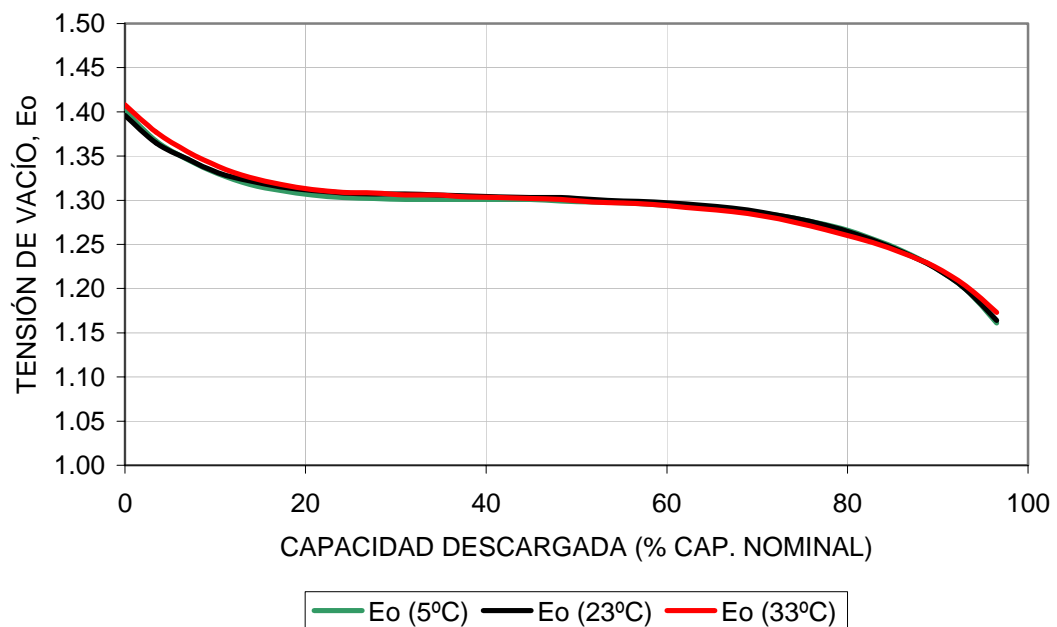


Figura 2-7. Evolución de la tensión de vacío (E_o) en las baterías de Ni-MH en función del estado de descarga y de la temperatura.

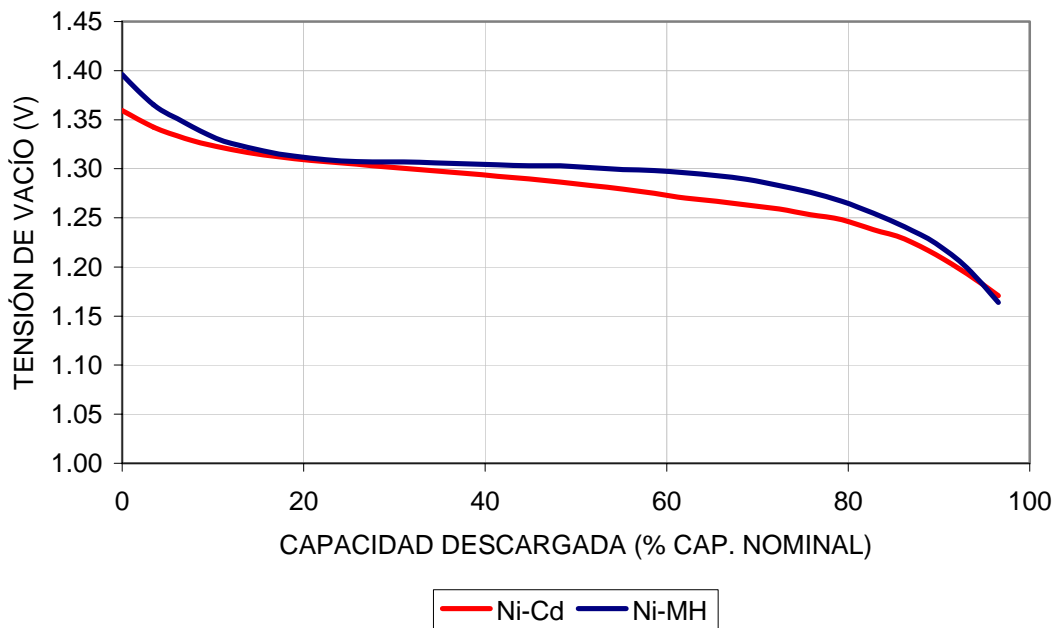


Figura 2-8. Evolución de la tensión de vacío en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH en función del estado de descarga y a temperatura ambiente de 23 °C.

2.2.1.2 Variables que influyen sobre la resistencia interna equivalente

Como se ha visto en el apartado 2.2.1 la resistencia interna equivalente tiene una marcada influencia en la evolución de la tensión en los terminales de la batería y en la capacidad de ésta para entregar una determinada potencia en una aplicación específica. El valor de la resistencia interna equivalente adquiere mayor importancia en las baterías de media y gran capacidad ya que las aplicaciones que las emplean manejan potencias elevadas.

Por este motivo, es conveniente realizar un estudio de los factores que hacen variar la resistencia interna equivalente de la batería, que son fundamentalmente el grado de descarga, la temperatura de trabajo y el historial de utilización de la batería (envejecimiento). El efecto fundamental de la historia de uso de la batería se refleja a través de un lento incremento de la resistencia interna equivalente. Este incremento se acelera si la batería sufre abusos durante su vida útil (sobrecargas, sobredescargas, temperaturas elevadas de funcionamiento).

Antes de comenzar con el análisis de la influencia que tienen las variables mencionadas sobre la resistencia interna equivalente de la batería es conveniente definir la forma de cálculo utilizada para obtener su valor.

La resistencia interna equivalente de una batería se calcula como la relación (en régimen permanente) entre la tensión de la batería en descarga menos la tensión de vacío y la corriente empleada en la descarga. La figura 2-9 muestra la evolución típica de la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH en función del grado de descarga.

Como se puede observar, la resistencia permanece estable durante la mayor parte de la descarga. De ahí que los fabricantes aporten en sus especificaciones un único valor de resistencia, escogiéndose para el cálculo de dicho valor el punto medio de la curva de descarga. La razón es que el valor de la resistencia interna equivalente es relativamente constante en el entorno de este punto y, por tanto, insensible a errores en su localización (ver figura 2-9). Además, como se muestra en el apartado 2.2.1.1 la tensión de vacío también exhibe una variación pequeña en el entorno de este punto.

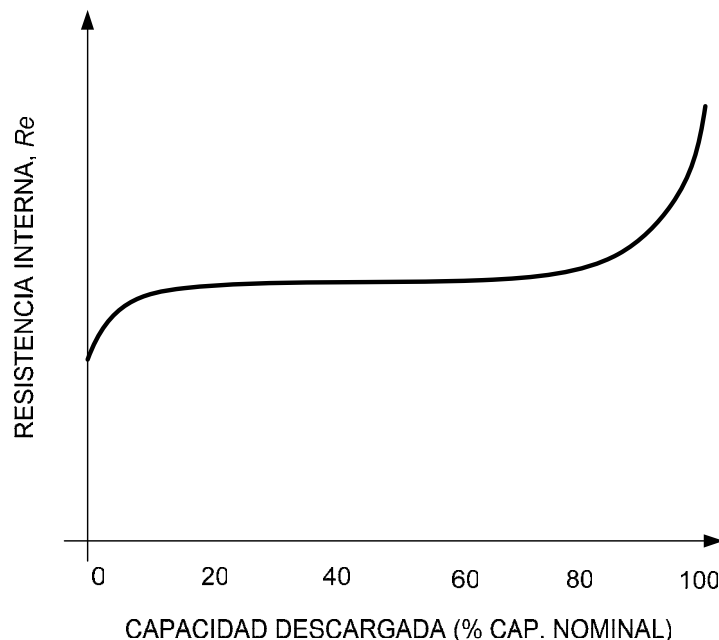


Figura 2-9. Evolución típica de la resistencia interna equivalente en celdas de Ni-Cd y Ni-MH durante la descarga a temperatura ambiente de 23 °C.

Un procedimiento que elimina la necesidad del cálculo de la tensión de vacío consiste en considerar dos razones de descarga diferentes. En este caso, el valor de la resistencia interna equivalente se calcula a partir de la relación entre dos valores de tensión media de descarga (aproximadamente cuando se ha descargado el 50 por ciento de la capacidad de la batería) correspondientes a dos valores de corriente de descarga diferentes; esta relación se muestra en la ecuación 2-4:

$$R_e = - \frac{E_{m1} - E_{m2}}{I_{d1} - I_{d2}} \quad (2-4)$$

donde:

E_{m1} Tensión de la batería cuando se ha descargado el 50 por ciento de su capacidad real utilizando una corriente de descarga (I_{d1}).

E_{m2} Tensión de la batería cuando se ha descargado el 50 por ciento de su capacidad real de la batería utilizando una corriente de descarga (I_{d2}).

La ecuación 2-4 relaciona el cambio en la tensión que exhibe una batería a diferentes razones de descarga. Esta relación es válida solo para cambios de un régimen permanente a otro, debiéndose permitir un tiempo para la eliminación del transitorio que se produce al inicio de cada descarga.

2.2.1.2.1 *Influencia del estado de descarga y de la temperatura sobre la resistencia equivalente de las baterías de Ni-Cd*

a) Influencia del estado de descarga

La resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-Cd permanece prácticamente constante en la zona media de la curva de descarga como se muestra en la figura 2-9.

La variación de la tensión de vacío de las baterías de Ni-Cd en la zona media de la curva de descarga es muy pequeña, observándose entre el 40 y el 60 por ciento de la descarga únicamente un pequeño decrecimiento (25 mV/celda) que se puede considerar lineal (ver figura 2-4). Por tanto, se considera asumible el error cometido

cuando se calcula el valor de la resistencia interna equivalente de una batería en ese margen considerando constante el valor de la tensión de vacío.

La resistencia interna equivalente en función del grado de descarga de la batería - entre un 40 y un 60 por ciento de capacidad descargada con respecto a la capacidad real de la batería- se muestra en la figura 2-10 en $m\Omega$ /celda. El valor de la tensión de vacío utilizado en los cálculos corresponde a un 50 por ciento de descarga de la capacidad real de la batería (1,290 mV/celda), y el régimen de descarga empleado para el cálculo fue de 0,2C a temperatura ambiente de 23 °C. Como se puede apreciar, la resistencia varía entre 1 y 2,5 $m\Omega$ /celda, lo que demuestra la baja resistencia interna que presentan estas baterías. No obstante, cuando la batería se aproxima a su descarga total se produce un rápido incremento de la resistencia interna equivalente según se muestra en la figura 2-9.

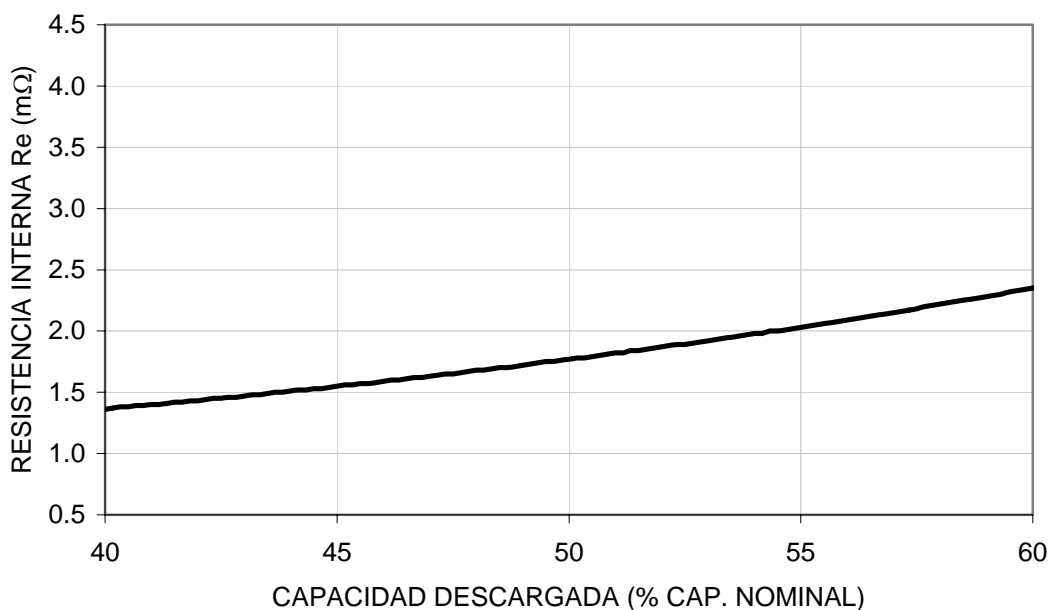


Figura 2-10. Evolución de la resistencia interna equivalente de una celda de Ni-Cd. Razón de descarga de 0,2C y temperatura ambiente de 23 °C.

b) Influencia de la temperatura

Uno de los elementos que más influye en la variación de la resistencia interna equivalente de la batería con la temperatura es el electrolito, ya que su conductividad se ve especialmente afectada por la temperatura.

En la figura 2-11 se muestra la variación de la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-Cd cuando la descarga se realiza con una razón de 0,2C a diferentes temperaturas, entre un 40 y un 60 por ciento de capacidad descargada con respecto a la capacidad real. En esta figura se puede comprobar el incremento que experimenta la resistencia interna equivalente de la batería como resultado de la disminución de la temperatura de funcionamiento.

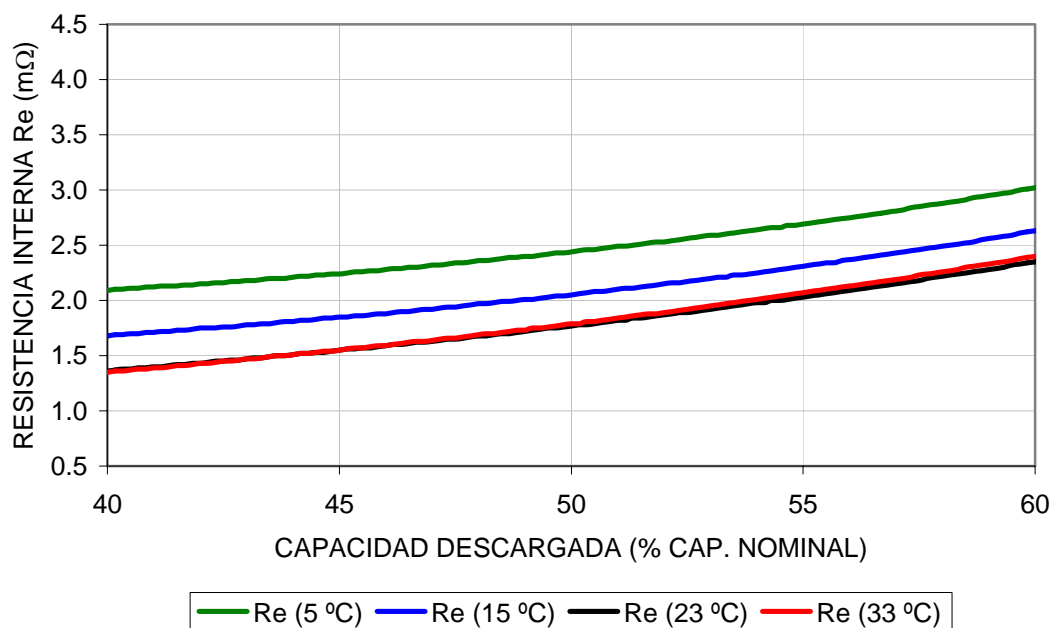


Figura 2-11. Evolución de la resistencia interna equivalente de las celdas de Ni-Cd a diferentes temperaturas (5 °C, 15 °C, 23 °C y 33 °C). Razón de descarga de 0,2C.

La resistencia se hace mínima cuando la temperatura de funcionamiento se establece en el entorno de 23 °C. Por encima de esta temperatura no se consigue un decrecimiento significativo de la resistencia interna equivalente (en la figura 2-11 se puede comprobar una clara coincidencia en la evolución de las curvas de resistencia a temperaturas de 23 °C y de 33 °C).

Por debajo de 23 °C la resistencia interna equivalente comienza a crecer, fundamentalmente debido al incremento de la viscosidad del electrolito que dificulta la circulación iónica. Las variaciones más significativas se registran cuando la temperatura ambiente durante la descarga es de 5 °C. En este caso, la resistencia interna equivalente se incrementa aproximadamente un 60 por ciento con respecto a la observada cuando la temperatura de funcionamiento es 23 °C.

2.2.1.2.2 Influencia del estado de descarga y de la temperatura en la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-MH durante el proceso de descarga.

a) Influencia del estado de descarga

El mismo análisis realizado en las baterías de Ni-Cd acerca de la influencia del estado de descarga sobre la resistencia interna equivalente se realiza para las baterías de Ni-MH. En la figura 2-12 se muestra la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-MH en función del grado de descarga - entre un 40 y un 60 por ciento de descarga con respecto a la capacidad real de la batería - empleándose para los cálculos un régimen de descarga de 0,2C a temperatura ambiente de 23°C. Los valores de resistencia interna equivalente mostrados en la figura 2-12 son muy parecidos a los observados en la tecnología de Ni-Cd (entre 1 y 2 mΩ).

El valor de la tensión de vacío (1,290 mV/celda) utilizado en el trazado de la curva corresponde a un 50 por ciento de descarga de la capacidad real de la batería. En la zona de la curva de descarga comprendida entre el 40 y el 60 por ciento, la tensión de vacío de las baterías de Ni-MH se mantiene casi invariable (variación de 6 mV/celda) según la figura 2-6) lo que permite aislar la influencia de este parámetro de la evolución de la resistencia interna equivalente.

Al final de la descarga se produce un rápido incremento de la resistencia (ver figura 2-9) acompañado de una disminución también rápida de la tensión de vacío de la batería (ver figura 2-6).

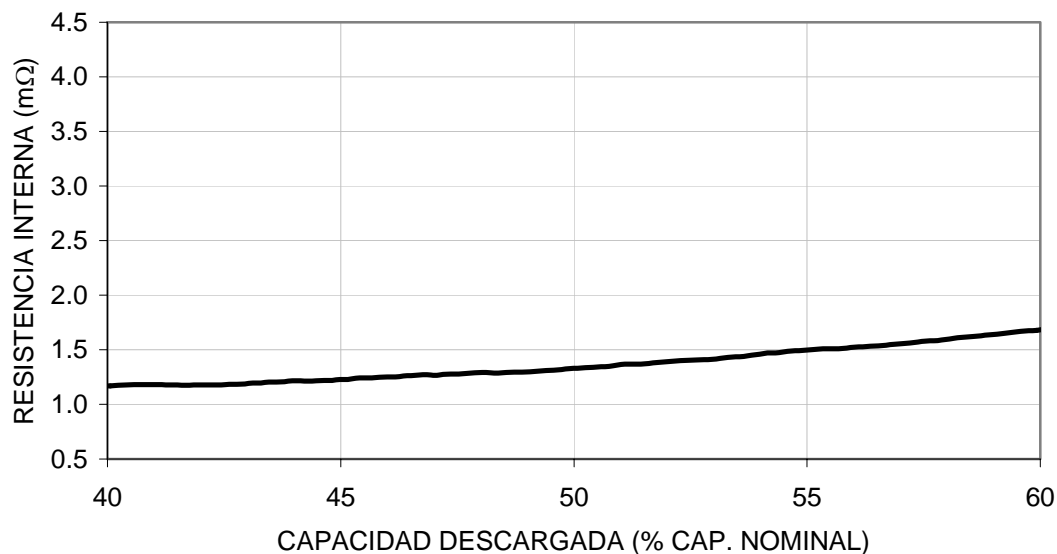


Figura 2-12. Evolución de la resistencia interna equivalente de una celda de Ni-MH. Razón de descarga de 0,2C y temperatura ambiente de 23 °C.

b) Influencia de la temperatura

La resistencia interna equivalente también varía de forma significativa en función de la temperatura en las baterías de Ni-MH. En la figura 2-13 se muestra la evolución de la resistencia interna equivalente de las baterías de Ni-MH cuando la descarga se realiza a 0,2C y a diferentes temperaturas, entre un 40 y un 60 por ciento de capacidad descargada.

Como se puede apreciar en las gráficas de la figura 2-13, al igual que en las baterías de Ni-Cd la resistencia interna equivalente se incrementa con la disminución de la temperatura. La resistencia mínima se observa cuando la temperatura de funcionamiento es de 33 °C. A medida que disminuye la temperatura de funcionamiento se produce un aumento de la resistencia interna equivalente que se incrementa en 1 mΩ/celda cuando la temperatura de funcionamiento de 5 °C, es decir el doble de la resistencia interna equivalente que se observa cuando la temperatura de funcionamiento se fija en 33 °C.

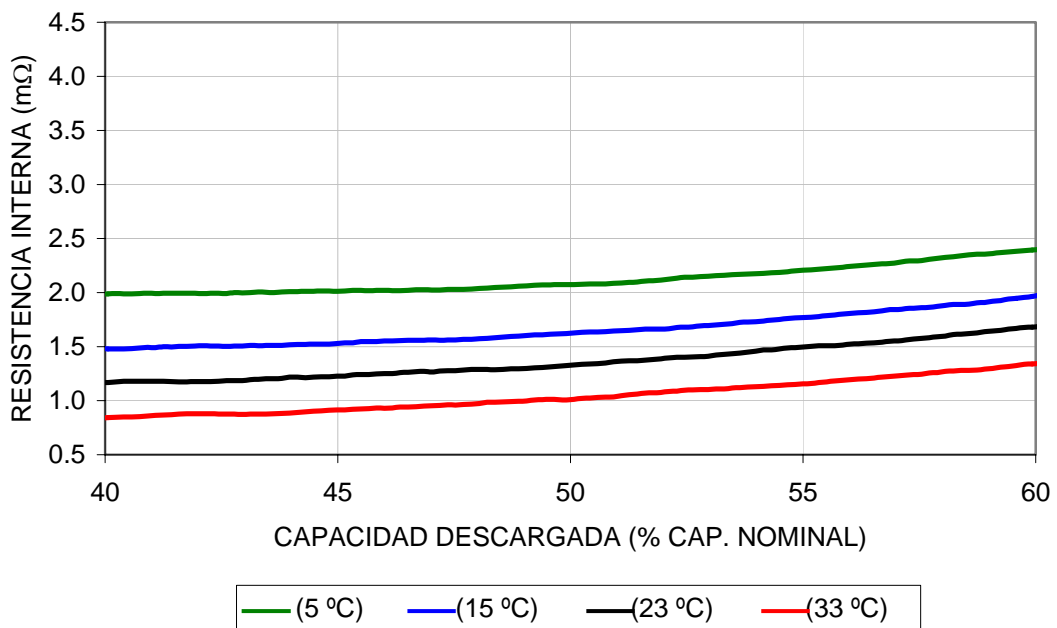


Figura 2-13. Evolución de la resistencia interna equivalente de las celdas de Ni-MH a diferentes temperaturas (5 °C, 15 °C, 23 °C y 33 °C). Razón de descarga de 0,2C.

2.2.2 Características de la tensión en descarga de las baterías

El perfil de la tensión en descarga de cualquier tecnología de batería es determinante a la hora de escoger una u otra tecnología para una aplicación en particular. Teniendo en cuenta la ecuación 2-3, la evolución de la tensión en bornes de la batería para un régimen de descarga determinado depende de la tensión de vacío y de la resistencia interna equivalente, dos parámetros de diseño de la batería que dependen a su vez del grado de descarga y de la temperatura ambiente.

Como se demuestra en los apartados 2.2.1.1.1 y 2.2.1.1.2, la tensión de vacío permanece muy estable durante la mayor parte de la descarga (aproximadamente entre el 20 y el 80 por ciento de descarga) y la variación en esta zona es bastante lineal. Por tanto, partiendo del valor de la tensión de vacío en el punto medio de la descarga (E_{om}) se puede considerar el efecto de la descarga como una recta que pasa por dicho punto y presenta una pendiente determinada por la caída de tensión producida (aproximadamente ± 30 mV/celda en Ni-Cd y ± 20 mV/celda en Ni-MH). La temperatura es la única variable de funcionamiento que afecta a dichos valores pero

también se ha comprobado en los apartados 2.2.1.1.1 y 2.2.1.1.2 que la variación es mínima en el margen de 5 °C a 33 °C.

Por tanto, la pérdida de tensión en descarga se debe principalmente a la razón de descarga empleada y a la evolución de la resistencia interna de la batería que sí se ve afectada por la temperatura ambiente (ver apartados 2.2.1.2.1 y 2.2.1.2.2). De ahí que la forma típica de la curva de tensión en descarga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH (ver figura 2-1) sea prácticamente una imagen reflejada de la curva que describe la resistencia interna en función de la capacidad descargada (ver figura 2-9).

Para un régimen de descarga dado, la tensión de las baterías sufre un ligero descenso casi lineal durante la mayor parte de la descarga (entre el 20% y el 80% de descarga) debido al lento incremento casi lineal de la resistencia interna. Las dos desviaciones en la tensión más significativas se producen al comienzo y al final de la descarga.

En cuanto a la caída de la tensión en la zona inicial de la curva de descarga, independientemente del estado de carga de una batería, siempre que comienza una descarga el transitorio que resulta de Rd y Cp (ver ecuación 2-1) mantiene la tensión al inicio de la descarga por encima del valor correspondiente al estado estable.

En la zona final de la curva de descarga, el incremento significativo de la resistencia interna causa un rápido decrecimiento de la tensión de la batería. Este incremento de la resistencia interna se debe a que la mayor parte del material activo disponible se ha convertido y cambiado a un estado de valencia menor durante la descarga de la batería. Por tanto, el aumento súbito de la resistencia interna marca la zona en que se produce la descarga total de la batería.

2.2.2.1 Evolución de la tensión y de la temperatura en las baterías de Ni-Cd durante la descarga

Como ejemplo que corrobora las conclusiones a las que se ha llegado en el estudio de los factores que afectan a la tensión de las baterías de Ni-Cd en descarga (ver apartados 2.2.1.1 y 2.2.1.2), la figura 2-14 muestra la evolución de la tensión en una

batería de Ni-Cd durante una descarga a corriente constante (régimen de descarga de 0,2C) y a temperatura ambiente de 23 °C.

Como se puede observar, una de las ventajas de la tecnología de Ni-Cd es la estabilidad de la tensión durante la descarga. Así, a la hora de calcular la energía suministrada por la batería durante una descarga a corriente constante, se trabaja generalmente con la “tensión media de descarga” - la tensión en la batería para un 50% de capacidad descargada – como tensión promedio durante toda la descarga.

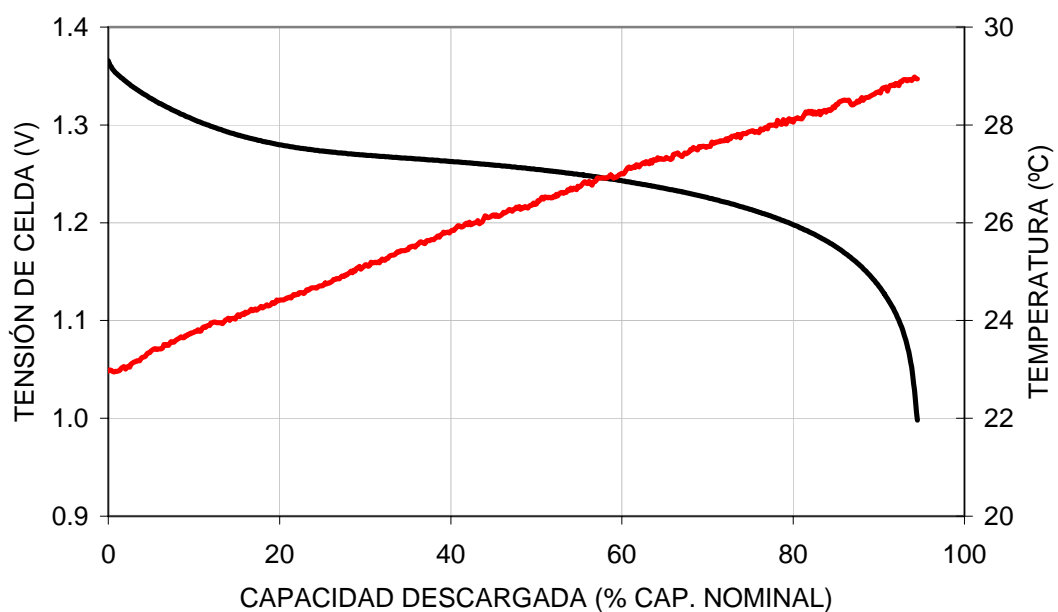


Figura 2-14. Evolución de la tensión y de la temperatura en una batería de Ni-Cd durante la descarga. Razón de descarga de 0,2C y 23 °C de temperatura ambiente.

Otro parámetro importante que debe analizarse durante la descarga de la batería es la temperatura. La figura 2-14 muestra junto a la curva de la tensión, la evolución de la temperatura en función de la capacidad descargada expresada como un tanto por ciento de la capacidad nominal de la batería.

Las reacciones electroquímicas de descarga de las baterías de Ni-Cd son reacciones exotérmicas y, por tanto, provocan un incremento continuo de la temperatura de la batería desde el comienzo de la descarga. En la figura 2-14 se puede apreciar un incremento de 6 °C respecto a los 23 °C de temperatura

ambiente. El incremento de la temperatura depende de la razón de descarga aplicada (evidentemente, cuanto mayor es la razón de descarga más pérdidas se producen y mayor es el incremento de temperatura).

- Influencia de la temperatura ambiente

La figura 2-15 muestra la evolución de la tensión en la batería durante su descarga manteniendo constante todas las condiciones en las que se realizó tanto la carga como la descarga, con excepción de la temperatura ambiente durante la descarga.

En la figura 2-16 se aprecia con más detalle la evolución de la tensión a diferentes temperaturas entorno al 50 por ciento de la descarga. En esta figura se puede comprobar que la variación de la tensión con respecto a la temperatura ambiente es poco significativa para temperaturas superiores a 23 °C; las pruebas realizadas a 23 °C y a 33 °C producen prácticamente la misma evolución en la tensión. Por el contrario, la figura 2-16 sí muestra cambios importantes en la tensión cuando las temperaturas descienden a 15 °C y, fundamentalmente, cuando la descarga se produce a 5 °C.

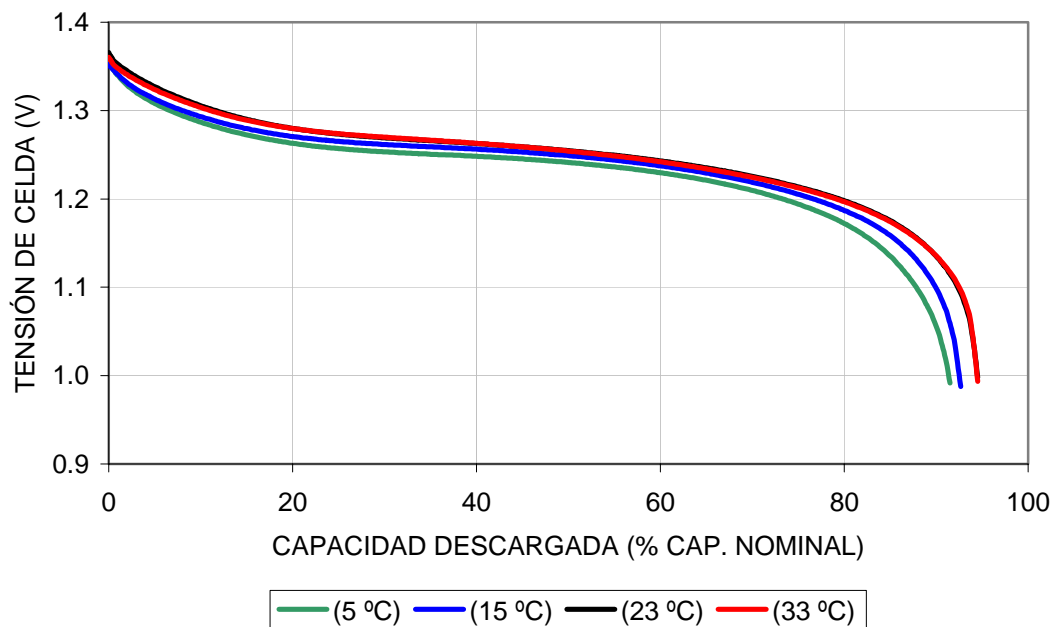


Figura 2-15. Evolución de la tensión en una batería de Ni-Cd durante la descarga a diferente temperatura ambiente. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

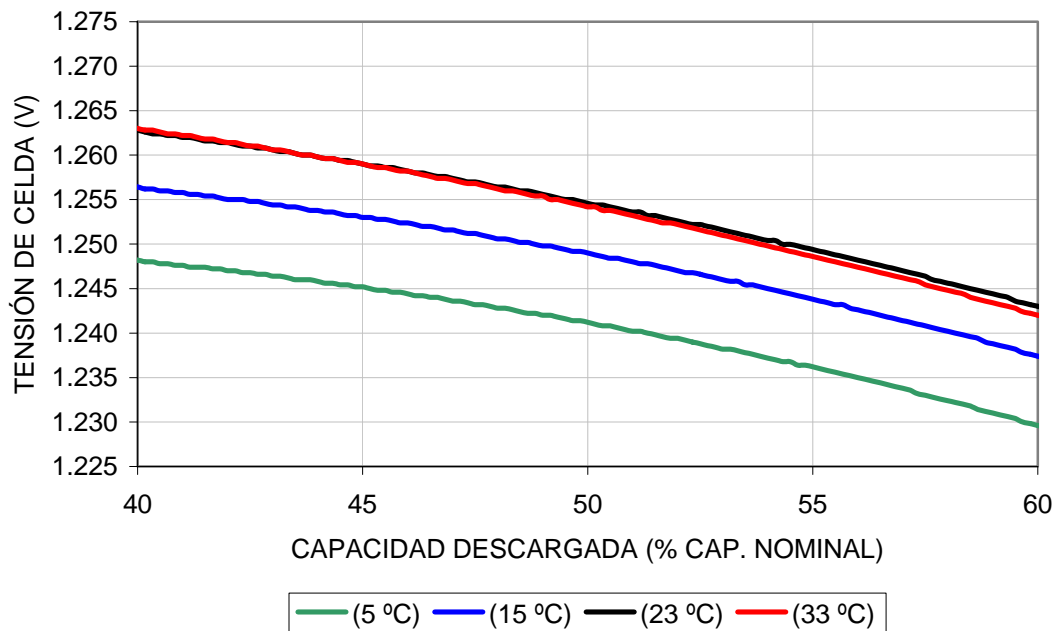


Figura 2-16. Evolución de la tensión en una batería de Ni-Cd en el entorno del 50 por ciento de descarga. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

Los resultados corroboran que el parámetro que más influye en la tensión en descarga de la batería es la resistencia interna puesto que las variaciones de la tensión en función de la temperatura siguen el comportamiento de la resistencia interna (ver apartado 2.2.1.2.1).

En cuanto a la evolución de la temperatura en la batería durante la descarga, la figura 2-17 muestra el incremento de temperatura en la batería con respecto a la temperatura ambiente para diferentes descargas en las que se han mantenido constantes todas las condiciones con excepción de la temperatura ambiente de descarga. El mayor incremento de la temperatura en la batería se observa cuando la temperatura ambiente es la más alta (33 °C).

En la tabla 2-1 se resumen algunas de las características observadas durante las descargas realizadas a baterías de Ni-Cd durante repetidos ciclos de carga-descarga; las baterías se cargaron siempre con una razón de 0,2 C y a temperatura ambiente de 23 °C y se descargaron a una razón de 0,2C y diferentes temperaturas ambiente.

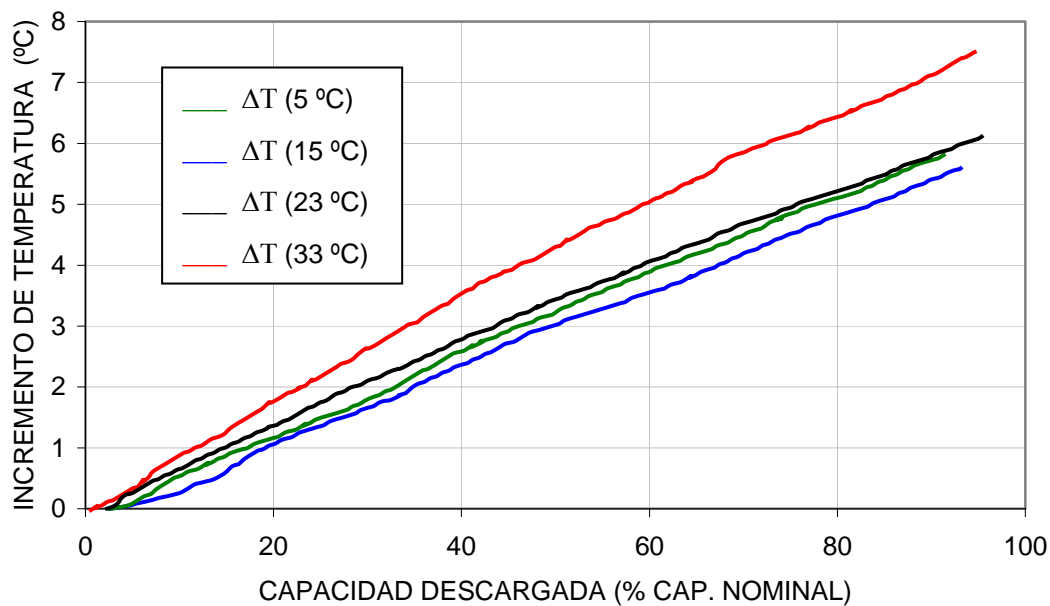


Figura 2-17. Evolución del incremento de la temperatura en una batería de Ni-Cd con respecto a la temperatura ambiente, durante descargas realizadas a diferente temperatura ambiente. Razón de descarga utilizada de 0,2 C.

TEMPERATURA DE DESCARGA				
	5 °C	15 °C	23 °C	33 °C
TENSIÓN MEDIA DE DESCARGA (V)	1,241	1,249	1,254	1,254
DURACIÓN (MIN.)	274,5	278	283,5	283,5
CAP. DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	93,1	95,8	96,4	96,6
INCREMENTO DE TEMP. ΔT (°C)	6,0	6,0	6,0	7,5

Tabla 2-1. Resumen de las características de descarga a diferente temperatura ambiente de baterías de Ni-Cd. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

Los resultados obtenidos permiten corroborar el buen comportamiento de las baterías de Ni-Cd a temperaturas bajas. Ésta es una ventaja importante con respecto a las baterías de plomo-ácido, donde una gran parte de la capacidad que

podiera suministrar la batería a temperatura ambiente normal se pierde cuando se trabaja a bajas temperaturas.

2.2.2.2 Evolución de la tensión y de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante la descarga

Como ejemplo que corrobora las conclusiones a las que se ha llegado en el estudio de los factores que afectan a la tensión de las baterías de Ni-MH en descarga (ver apartados 2.2.1.1 y 2.2.1.2), la figura 2-18 muestra la evolución de la tensión en una batería de Ni-MH durante una descarga a corriente constante (régimen de descarga de 0,2C) y a temperatura ambiente de 23 °C. Como se puede apreciar, la curva evoluciona de forma muy parecida a la curva de tensión en la tecnología de Ni-Cd. Esta es una característica importante ya que posibilita el uso alternativo de una u otra tecnología en las aplicaciones.

En la curva de tensión de la figura 2-18 se puede apreciar que la tensión permanece estable durante una gran parte del proceso de descarga (la meseta de tensión abarca un área que representa un tanto por ciento elevado del área total de descarga y resulta más plana que la observada en Ni-MH).

La figura 2-18 muestra junto a la curva de la tensión, la evolución de la temperatura en función de la capacidad descargada expresada como un tanto por ciento de la capacidad nominal de la batería. A diferencia de lo que ocurre en las baterías de Ni-Cd, las reacciones electroquímicas de descarga en las baterías de Ni-MH tienen carácter endotérmico y, como resultado, el incremento de temperatura en la batería durante la descarga es menor; en este caso, el calor proviene fundamentalmente de las pérdidas óhmicas.

En las baterías de Ni-Cd (ver figura 2-17) el aumento de la temperatura se produce desde el comienzo de la descarga y evoluciona casi de forma lineal hasta el final de la descarga. En las baterías de Ni-MH no se observa un incremento significativo de la temperatura al inicio de la descarga y, posteriormente, la pendiente de la temperatura es menor. Como resultado, bajo las mismas condiciones de trabajo el incremento de la temperatura es menor en las baterías de Ni-MH. Por tanto, la

naturaleza endotérmica de las reacciones de descarga en las baterías de Ni-MH las convierte en una buena opción cuando se necesita entregar potencias altas en una aplicación específica.

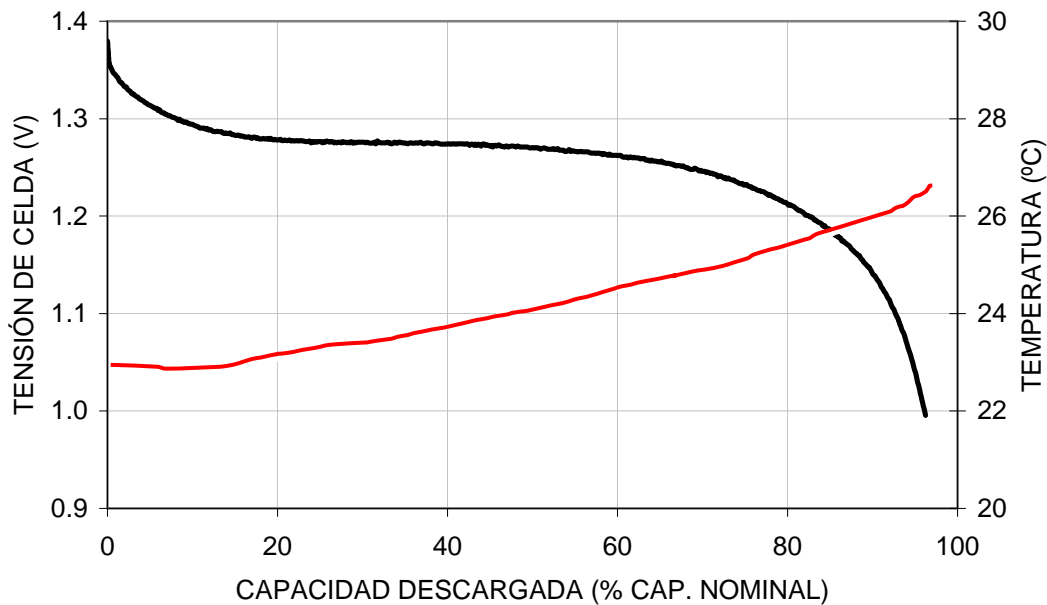


Figura 2-18. Evolución de la tensión y de la temperatura en una batería de Ni-MH durante la descarga. Razón de descarga: 0,2C. Temperatura ambiente: 23 °C.

- Influencia de la temperatura ambiente

La figura 2-19 muestra la evolución de la tensión en la batería durante su descarga manteniendo constante todas las condiciones en las que se realizó tanto la carga como la descarga, con excepción de la temperatura ambiente durante la descarga.

En la figura 2-20 se aprecia con más detalle la evolución de la tensión a diferentes temperaturas entorno al 50 por ciento de la descarga. En esta figura se puede comprobar que la variación de la tensión con respecto a la temperatura ambiente es mayor que en el caso de baterías de Ni-Cd (ver figuras 2-16 y 2-20). La diferencia de tensión observada en baterías de Ni-MH es de 24 mV/celda (entre las temperaturas de 5 °C y 33 °C), cuando en las baterías de Ni-Cd solo se observa una diferencia de 13 mV/celda.

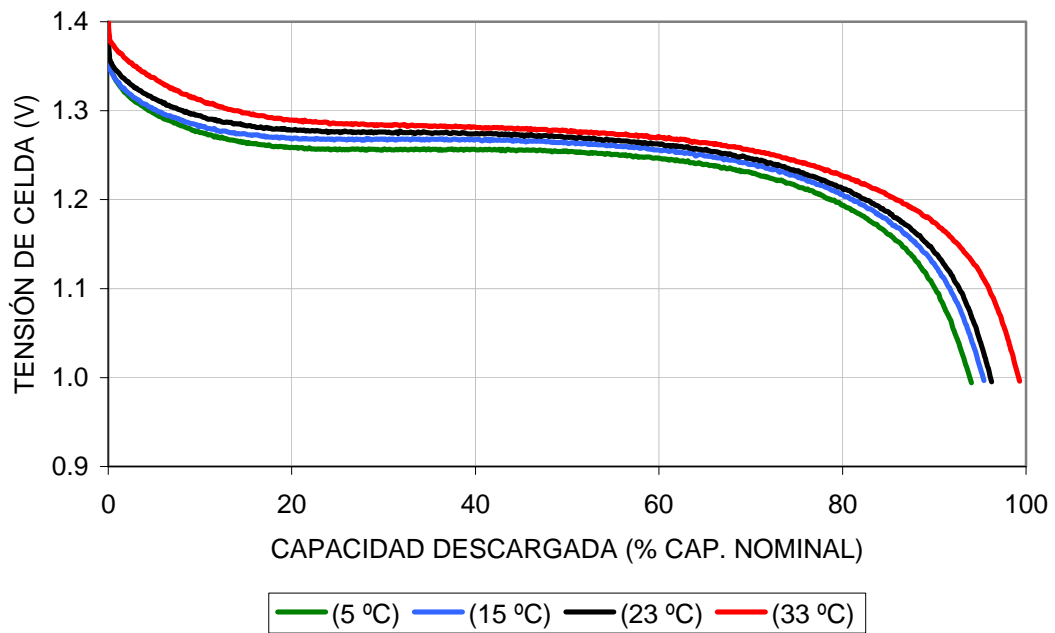


Figura 2-19. Evolución de la tensión en una batería de Ni-MH durante la descarga a diferente temperatura ambiente. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

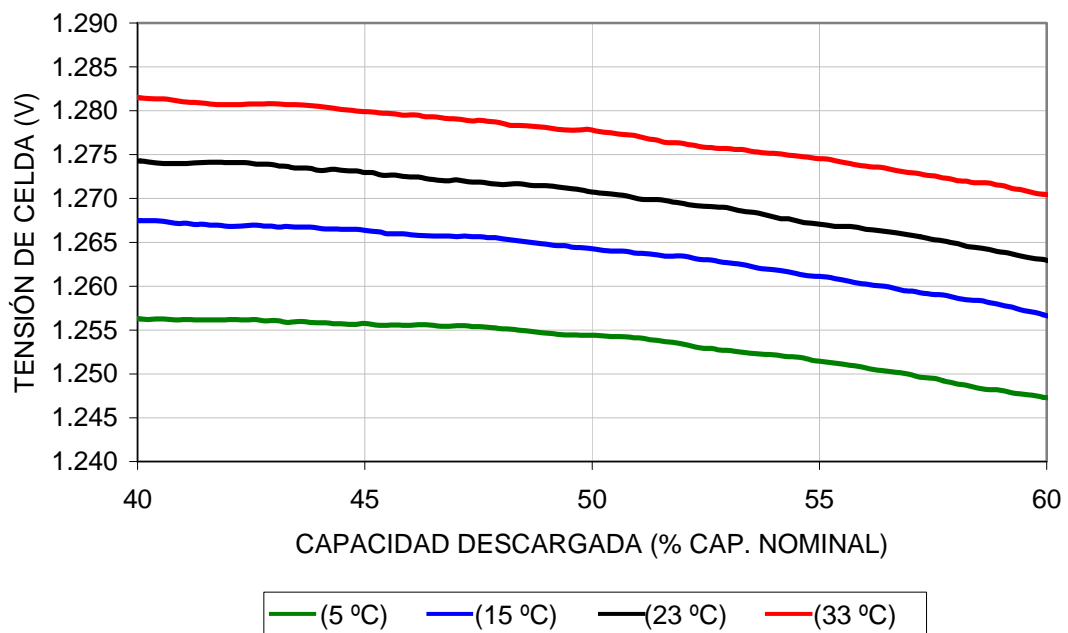


Figura 2-20. Evolución de la tensión en una batería de Ni-MH en el entorno del 50 por ciento de descarga. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

El incremento de temperatura de la batería que se produce durante la descarga a diferentes temperatura ambiente se muestra en la figura 2-21. Como se puede observar, el incremento de temperatura es menor que el mostrado por las baterías de Ni-Cd debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones electroquímicas en las baterías de Ni-MH.

En la tabla 2-2 se resumen algunas de las características observadas durante los ciclos de carga-descarga realizados a baterías de Ni-MH. La carga se realiza a 0,2C y temperatura ambiente de 23 °C y la descarga se realiza a 0,2C y diferentes temperaturas ambiente.

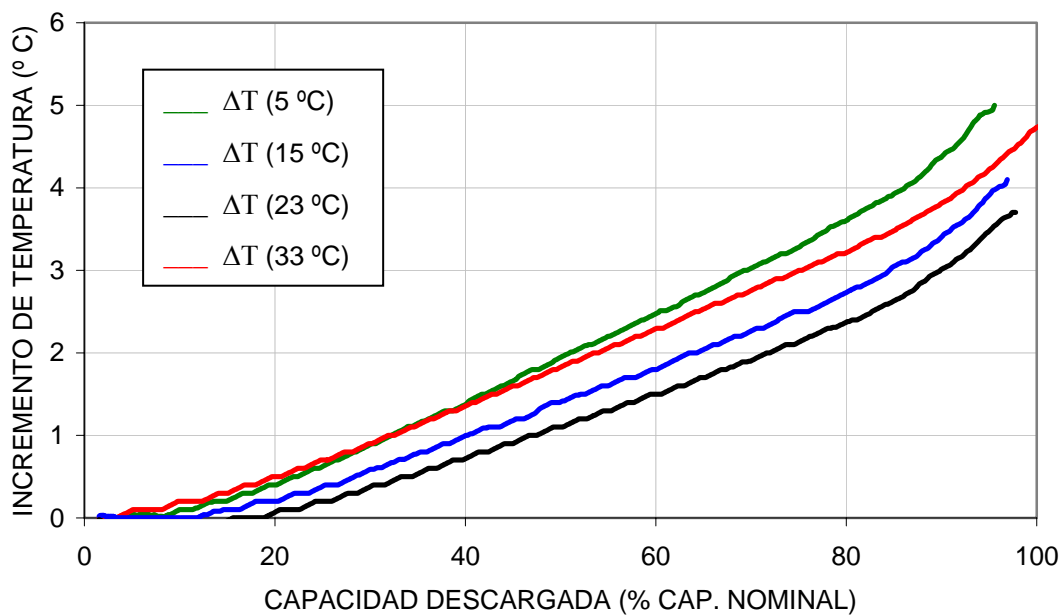


Figura 2-21. Evolución del incremento de la temperatura en una batería de Ni-MH con respecto a la temperatura ambiente, durante descargas realizadas a diferente temperatura ambiente. Razón de descarga utilizada de 0,2 C.

TEMPERATURA DE DESCARGA

	5 °C	15 °C	23 °C	33 °C
TENSIÓN MEDIA DE DESCARGA (V)	1,254	1,263	1,270	1,277
DURACIÓN (MIN.)	277,0	281,0	283,5	292,5
CAP. DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	94,0	95,4	96,3	99,3
INCREMENTO DE TEMP. ΔT (°C)	5,0	4,0	4,0	5,0

Tabla 2-2. Resumen de las características de descarga a diferente temperatura ambiente de baterías de Ni-MH. Razón de descarga utilizada de 0,2C.

2.3 LA CAPACIDAD

La capacidad que puede entregar una batería durante su descarga es otro índice de comportamiento importante que se debe tener en cuenta cuando se estudia el proceso de descarga. La capacidad se obtiene sometiendo la batería a una descarga total e integrando la corriente sobre el período de duración de la descarga en unas condiciones específicas de temperatura ambiente, régimen de descarga y tensión de finalización de la descarga (ver apartado 1.3.2 del capítulo 1).

El método más común de medida de la capacidad se basa en realizar la descarga de la batería a corriente constante. De esta forma, se realiza un seguimiento de la tensión hasta que se alcanza el valor especificado de finalización de la descarga (EODV) y con solo multiplicar el tiempo transcurrido para alcanzar esta tensión por la corriente de descarga utilizada se obtiene el valor de la capacidad descargada.

Las diferencias entre la capacidad medida en unas determinadas condiciones estandarizadas y la capacidad real que puede entregar la batería se producen por variaciones en la temperatura durante la carga, la razón de carga, la temperatura durante la descarga o la razón de descarga aplicada a la batería.

En las secciones siguientes se analiza la influencia de algunos de estos parámetros en la capacidad que realmente puede ser descargada de una batería, tanto de Ni-Cd

como de Ni-MH. El análisis se centra fundamentalmente en la influencia que tienen las condiciones en que se realiza la descarga de la batería sobre la capacidad real ya que la influencia producida por las condiciones en que se realiza la carga se analiza en detalle en el capítulo 4 (dedicado al estudio de las características de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH durante los procesos de carga).

Fundamentalmente, existen dos variables asociadas con el proceso de descarga que influyen sobre el valor de la capacidad real que puede ser obtenida de las baterías. Estas variables son la razón de descarga utilizada y la temperatura ambiente.

2.3.1 Influencia de la razón de descarga y de la temperatura de trabajo sobre la capacidad real de las baterías

Con el aumento de la razón de descarga se dificultan las reacciones en los electrodos y la circulación iónica a través del electrolito. La influencia de la razón de descarga sobre la capacidad real que puede obtenerse de la batería no es significativa a temperaturas próximas a 23 °C y cuando se utilizan razones de descarga bajas.

A medida que aumenta la razón de descarga disminuye la capacidad que se puede extraer de la batería y se produce un aumento de la temperatura. De ahí que los fabricantes den información en los catálogos sobre el comportamiento de las baterías a diferentes regímenes de descarga y bajo diferentes condiciones de temperatura [15][20][91].

Dado que el interés fundamental de este trabajo es el estudio de los procesos de carga y especialmente de carga rápida, se escoge una razón de descarga de 0,2C para todos los ensayos de laboratorio, de manera que sea una condición estándar que no influya en el análisis de los procesos de carga. Esta razón de descarga es la que utilizan los fabricantes de baterías para especificar la capacidad nominal.

La capacidad real que puede ser descargada de una batería de Ni-Cd o de Ni-MH disminuye a medida que lo hace la temperatura ambiente. Esto se debe

fundamentalmente a la dificultad para la circulación iónica a través de un electrolito que se hace cada vez más viscoso.

El efecto de la temperatura sobre la capacidad real de la batería se muestra en las tablas 2-1 y 2-2 de este capítulo (para Ni-Cd y Ni-MH respectivamente). Como se puede observar, la influencia de la temperatura sólo es significativa a bajas temperaturas (5 °C), con una pérdida de capacidad del 3 por ciento en las baterías de Ni-Cd a 5 °C con respecto a 23°C, y un 2 por ciento en el caso de las baterías de Ni-MH. Aún así, esta pérdida de capacidad es mucho menor que la que presentan otras tecnologías de baterías, lo que demuestra el buen comportamiento de las tecnologías de Ni-Cd y de Ni-MH a bajas temperaturas.

Para evitar el error que introduce la influencia de la temperatura ambiente de descarga sobre la capacidad en los ensayos cíclicos de carga-descarga a 5 °C, se introduce un factor de corrección que compensa el efecto de caída de la capacidad descargada a esta temperatura.

2.3.2 Influencia de la tensión de finalización de la descarga sobre la capacidad real de las baterías

La tensión de finalización de la descarga tiene una influencia directa sobre la capacidad que puede ser extraída de la batería; como es evidente, mientras mayor sea la tensión de finalización menor será la capacidad.

En las baterías de Ni-Cd y Ni-MH se suele fijar la tensión de finalización de la descarga en 1 V/celda ya que por debajo de este valor la tensión cae súbitamente y la capacidad disponible es prácticamente nula, como se puede observar en las figuras 2-22 y 2-23. En esta zona, donde la batería ha agotado prácticamente toda su capacidad la velocidad de decrecimiento de la tensión es mucho mayor que durante la mayor parte del proceso de descarga. Por este motivo, en un tiempo muy corto y dependiendo de la razón de descarga utilizada la tensión de la celda cae hasta cero voltios e incluso puede invertir su polaridad (ver figuras 2-22 y 2-23).

El uso de valores más elevados de finalización de la descarga afecta a la precisión en la medida de la capacidad. La variación de la tensión en la parte lineal de la curva de descarga es muy pequeña por lo que si la medida de la tensión en esta zona no es suficientemente precisa se produciría un error significativo en la capacidad obtenida.

De ahí que se haya empleado 1 V/celda como tensión de finalización de la descarga en todos los ensayos realizados. En otras ocasiones, la finalización de la descarga está sujeta a límites impuestos por los requerimientos de la aplicación en particular por lo que la tensión de finalización de la descarga es superior a 1 V/celda.

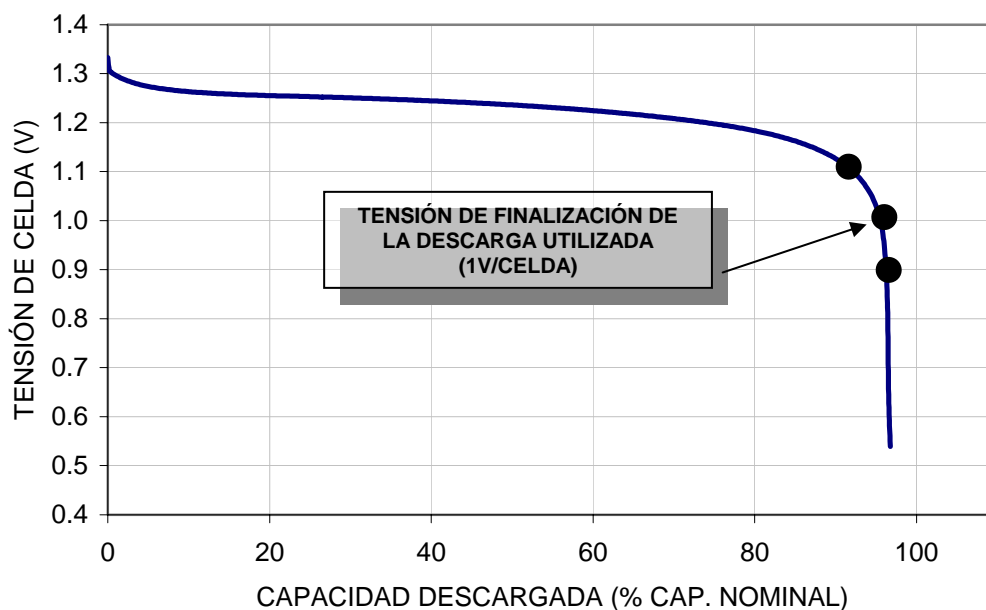


Figura 2-22. Evolución de la tensión de celda durante la descarga de una batería de Ni-Cd con una razón de 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

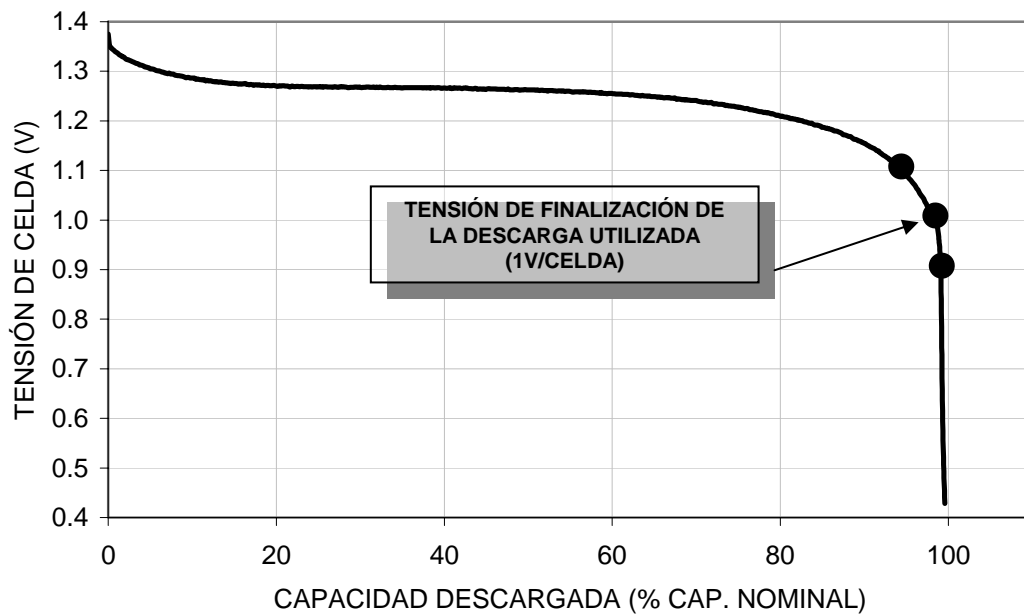


Figura 2-23. Evolución de la tensión de celda durante la descarga de una batería de Ni-MH con una razón de 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

2.4 OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS DE NI-CD Y NI-MH DURANTE LA DESCARGA

El comportamiento de las baterías durante la descarga depende tanto de su estado como del entorno y de las condiciones de funcionamiento. En los apartados anteriores se han analizado la influencia de la temperatura, la razón de descarga y el propio estado de descarga de la batería.

Además de los parámetros estudiados, existen otros factores que producen cambios en el comportamiento de la batería, destacándose:

- La inversión de la polaridad de la celda
- El efecto memoria

2.4.1 La inversión de la polaridad de la celda

Generalmente, las aplicaciones emplean baterías formadas por grupos de celdas en forma de monobloques y no por la agrupación de celdas individuales. Aunque se ha avanzado mucho en lograr una uniformidad en las características de las celdas utilizadas para formar monobloques, nunca están exentas de diferencias de comportamiento.

Las diferencias en la capacidad real de las celdas que componen una batería en forma de monobloque pueden provocar que una celda se descargue totalmente antes que el resto. En este caso, la celda de menor capacidad real determina la capacidad real de la batería. En muchas ocasiones no es posible tener disponible los terminales de cada una de las celdas que componen un monobloque y por tanto no es posible conocer su tensión en particular durante su funcionamiento. Esto puede provocar que aún cuando la tensión del monobloque que forma una batería esté por encima de su tensión de finalización de la descarga puede haber una celda específica en la que su tensión haya descendido por debajo de la tensión de celda de finalización de la descarga. En condiciones críticas esto puede resultar en tensiones de celda muy por debajo de la tensión aconsejada en la mayoría de los casos, 1 V/celda, en función de las condiciones en que se realiza la descarga llegando incluso a 0 V/celda.

De esta manera, si se continúa la descarga después que la celda de menor capacidad ha alcanzado cero voltios, se producirá la inversión de la polaridad de la tensión en sus terminales. Cuando la polaridad de la celda se invierte y supera una determinada tensión negativa, la celda comienza a generar gas internamente. La degradación del comportamiento de las celdas debido a reiteradas inversiones de la polaridad es un proceso acumulativo. La magnitud de la degradación depende, tanto de la profundidad de la descarga en este estado de inversión de la polaridad, como de la frecuencia con que esto ocurre durante la vida de la batería.

2.4.2 El efecto memoria

Un aspecto importante durante el uso de baterías de Ni-Cd y de Ni-MH está relacionado con la forma en que se realiza la descarga. No siempre la batería se descarga completamente y en ocasiones pueden producirse descargas parciales de forma repetidas en determinadas aplicaciones.

Las descargas parciales en baterías de Ni-Cd están asociadas con una pérdida transitoria de una parte de la capacidad efectiva que puede ser extraída de la batería. Este fenómeno se le conoce comúnmente como “efecto memoria”. Este efecto se produce fundamentalmente en baterías de Ni-Cd de placas sinterizadas (muy utilizadas en aplicaciones donde se requieren repetidos ciclos de carga-descarga). De cualquier forma, este fenómeno ocurre en aquellos casos donde la batería se somete a un mismo tipo proceso de carga y descarga parcial durante repetidos ciclos de carga-descarga (se descarga parcialmente la batería en cada ciclo de una manera muy similar y se recarga nuevamente).

Estas descargas parciales de forma repetidas, impiden la transformación de todo el material activo de los electrodos. El material activo que no se transforma sufre cambios morfológicos que dificultan su transformación cuando se requiere la descarga de un porcentaje mayor de capacidad a la que se venía descargando en ciclos anteriores, es decir una descarga de mayor profundidad [29].

Para comprobar en el laboratorio el efecto de este fenómeno y evitar su posible influencia en el desarrollo de los ensayos de carga, se procede a realizar un conjunto de ciclos de carga y descargas parciales.

Después de realizar 60 ciclos de carga-descarga (descarga solo de un 20 por ciento de la capacidad nominal de la batería y recarga total) se realiza una descarga completa de la batería y se constata una reducción de un 16 por ciento de la capacidad con respecto a la capacidad obtenida cuando se utilizan ciclos completos de carga-descarga. La evolución de la tensión de celda durante la descarga de la batería, antes y después de aplicar ciclos de carga-descarga (descargas parciales), se puede observar en la figura 2-24.

No obstante, hay que señalar que después de un par de ciclos completos de carga-descarga, se recuperó casi la totalidad de la capacidad efectiva que se podía extraer de la batería antes de realizar los ciclos que incluían descargas parciales.

En la práctica diaria, es difícil encontrarse con procesos donde la batería se descargue, exactamente, en las mismas condiciones y en la misma proporción. Por este motivo, no debe aumentar la preocupación al respecto. En pruebas de laboratorio, donde se establecen unas condiciones de ensayos que se repiten en condiciones controladas muy similares, si es posible encontrar con frecuencia este fenómeno y debe tenerse en cuenta.

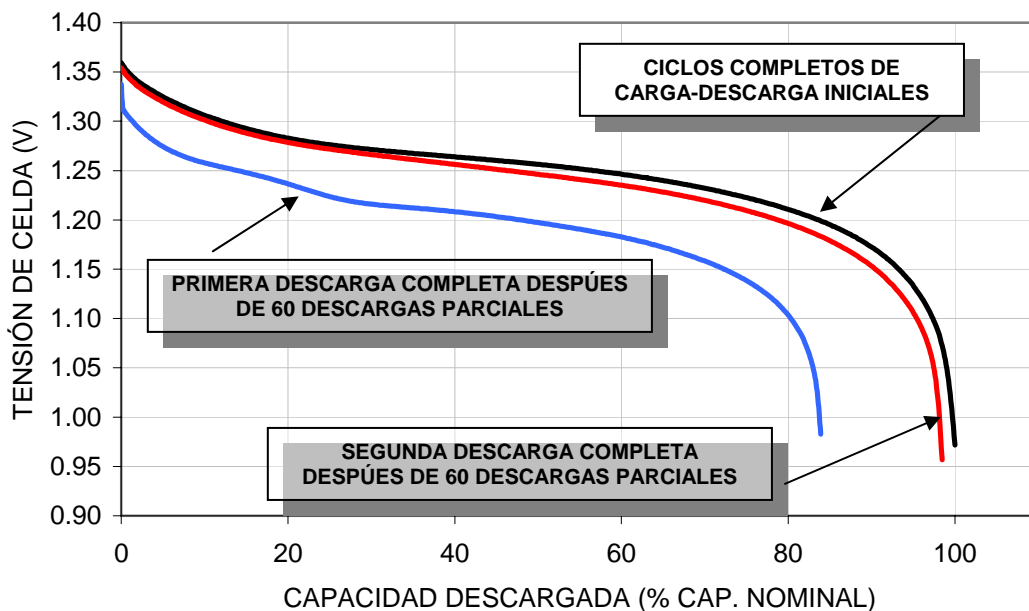


Figura 2-24. Influencia de repetidos ciclos de carga-descarga (descargas parciales) en la tecnología de Ni-Cd.

Para comprobar el comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se las somete a repetidos ciclos de carga y descargas parciales, con la finalidad de conocer si estas baterías también están afectadas por el efecto memoria, se aplicaron las mismas condiciones de ensayo utilizadas en las baterías de Ni-Cd (60 ciclos de carga-descarga con descargas de solo un 20 por ciento de la capacidad nominal de la batería y recarga total). Después de aplicar los correspondientes ciclos de carga y

descargas parciales se sometió a la batería a varios ciclos de carga-descarga completos, para de esta forma determinar la influencia de las descargas parciales tanto en la tensión de la batería como en la capacidad que es posible descargar de la misma.

La figura 2-25 muestra las curvas de tensión de celda durante la descarga de la batería antes de ser sometida a repetidos ciclos con descargas parciales, durante el primer ciclo completo de carga-descarga después de aplicar las descargas parciales y durante el segundo ciclo de carga-descarga completo.

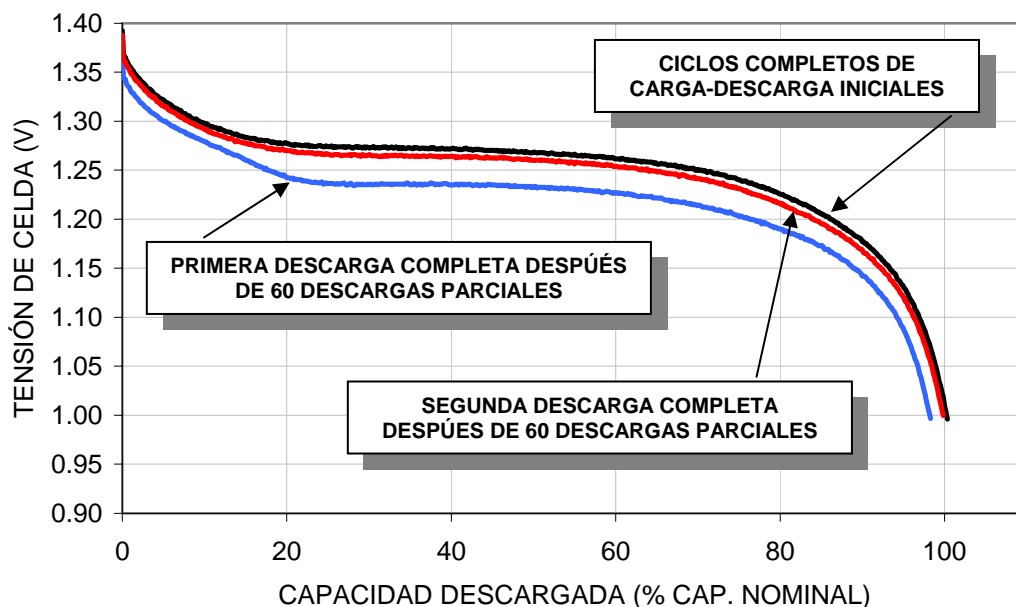


Figura 2-25. Influencia de repetidos ciclos de carga-descarga (descargas parciales) en la tecnología de Ni-MH.

Como se puede apreciar en la figura 2-25 la tensión de celda sufre una deformación (depresión de la tensión) parecida a la observada en baterías de Ni-Cd. No obstante, se puede observar que la caída de la tensión de celda es menos pronunciada en las baterías de Ni-MH y además la pérdida de capacidad que se produce en estas baterías debido a los repetidos ciclos de carga y descargas parciales es mucho menor a la observada en baterías de Ni-Cd (pérdida transitoria de un 2 por ciento de la capacidad).

Como se ha constatado el efecto memoria es un fenómeno que afecta en mayor grado a las baterías de Ni-Cd. No obstante, como se ha podido comprobar solo estamos en presencia de una pérdida temporal de la capacidad que se puede descargar de la batería.

Tanto en baterías de Ni-Cd como en baterías de Ni-MH la pérdida transitoria de la capacidad o las deformaciones que tienen lugar en la curva de tensión de la batería se pueden recuperar prácticamente en su totalidad después de aplicar dos ciclos completos de carga-descarga de forma consecutiva.

CAPÍTULO

3

**METODOLOGÍA DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO
DEL COMPORTAMIENTO EN CARGA DE LAS
BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH**

3 METODOLOGÍA DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN CARGA DE LAS BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH

3.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente no se dispone de información suficientemente detallada sobre el comportamiento de las baterías de media y gran capacidad cuando éstas se someten a repetidos ciclos de carga-descarga, fundamentalmente cuando se utilizan razones de carga elevadas. Estos estudios son aún más escasos cuando se trata de tecnologías de baterías avanzadas como la de Ni-Cd y la de Ni-MH.

Existen numerosos artículos publicados en congresos y revistas que tratan la problemática relacionada con el diseño de cargadores de baterías desde el punto de vista del convertidor de potencia, su topología, la selección de sus componentes, su eficiencia y otros aspectos [4] [8] [21] [36] [50] [53] [54] [58] [60] [77]. Sin embargo, en ellos no se considera o se considera de forma muy simple la respuesta de la batería ante el régimen de carga impuesto. La carencia de un estudio fiable sobre el comportamiento de la batería ante diferentes regímenes de carga puede conducir a la utilización de razones de carga excesivas que afecten la vida útil de la batería, llegando a deteriorarla de forma prematura. El impacto sobre la vida útil de la batería es aún mayor cuando se utiliza carga rápida para intentar disminuir el tiempo de carga. La vida de la batería puede verse acortada debido a un envejecimiento prematuro causado fundamentalmente por sobrecargas [42].

El comportamiento de una batería durante regímenes cíclicos de carga-descarga depende de muchas variables, fundamentalmente del método empleado para su recarga, el tipo de descarga a la que se le somete, la temperatura de funcionamiento, el tiempo de uso y los abusos a que haya sido sometida durante su vida de servicio. Por este motivo, es verdaderamente difícil encontrar un modelo matemático que emule el comportamiento de la batería y permita evaluar en cada

instante de tiempo la respuesta que se obtendría de la batería durante su funcionamiento [85].

Por tanto, la forma más fiable de estudiar el comportamiento de una batería durante su funcionamiento, especialmente bajo razones de carga altas es mediante la experimentación, es decir, la realización de repetidos ensayos en diferentes condiciones de funcionamiento [98]. Además, la información obtenida de los ensayos va a ayudar a la obtención de modelos matemáticos cada vez más precisos y fiables.

La experimentación adquiere especial importancia en el caso de tecnologías de baterías novedosas, que buscan dar respuesta a un mercado cada vez más exigente, dada la falta de experiencia previa. Las baterías de níquel-cadmio y de níquel-hidruro metálico constituyen un ejemplo de este tipo de tecnologías ya que se emplean en sistemas que demandan prestaciones altas desde hace relativamente poco tiempo.

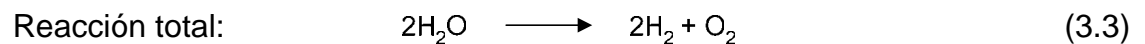
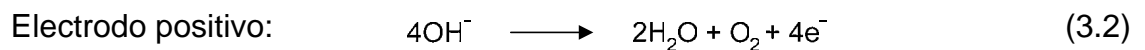
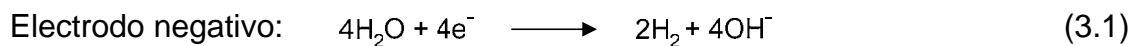
Uno de los problemas principales para realizar la experimentación, debido a lo novedoso de las tecnologías de baterías que se estudian, es la falta de ensayos normalizados y de metodologías de trabajo, especialmente en las baterías de Ni-MH de media y gran capacidad. Estos problemas se hacen más evidentes cuando los estudios que se pretenden realizar son de carga rápida. Por este motivo, es necesario desarrollar una metodología adecuada que permita realizar ensayos normalizados de carga rápida y además, diseñar a medida e implementar los bancos de ensayos que permitan poner en marcha dicha metodología.

3.2 BATERÍAS EMPLEADAS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Actualmente, en el mercado existen diferentes tecnologías de fabricación de baterías de Ni-Cd y Ni-MH. No obstante, es importante destacar que para capacidades medias y altas las diferencias constructivas de las baterías vienen determinadas por la aplicación para la que se selecciona la batería. La principal diferencia constructiva y que mayor influencia tiene sobre el comportamiento de la batería cuando se carga a regímenes elevados (carga rápida) radica en que el recipiente que contenga las celdas sea de tipo abierto o de tipo sellado.

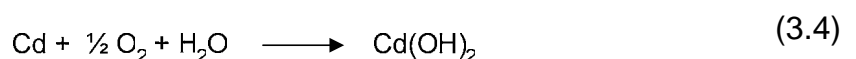
En las baterías abiertas no se permite la recombinación de gases que se producen en los electrodos durante su sobrecarga (oxígeno e hidrógeno). Los gases producidos tanto en el electrodo positivo como en el negativo se liberan hacia el exterior de la batería a través de conductos específicos para este fin. Por el contrario, en una batería sellada sí se permiten las reacciones de recombinación de gases y se evita su salida al exterior.

Las principales reacciones de sobrecarga en las baterías de Ni-Cd abiertas son:



Los gases que se producen durante la sobrecarga según la ecuación 3.3 se expulsan al exterior de la batería. La proporción de oxígeno que se produce en el electrodo positivo durante la carga es menor que durante la sobrecarga y depende de la razón de carga utilizada. En el electrodo negativo no se produce hidrógeno durante la carga pero una vez que este electrodo se sobrecarga la producción de hidrógeno se incrementa rápidamente y la eficiencia del proceso de carga disminuye de forma drástica.

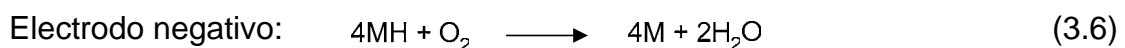
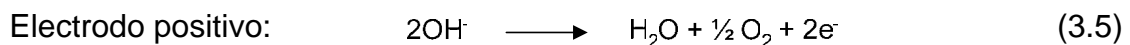
En el caso de baterías de Ni-Cd selladas se permite que el oxígeno que se produce en el electrodo positivo según la ecuación 3.2 (el electrodo positivo alcanza la sobrecarga antes que el electrodo negativo debido a las características de diseño) alcance el electrodo negativo y reaccione formando hidróxido de cadmio según la ecuación 3.4:



De esta forma se logra convertir el oxígeno que se produce durante la carga y se evita el aumento de la presión interna de la batería.

El hidrógeno que se produce cuando se sobrecarga el electrodo negativo no se recombina y hace aumentar la presión interna de la batería. Cuando se rompe el equilibrio interno el gas tiene que ser expulsado al exterior de la batería.

Las principales reacciones de sobrecarga en las baterías de Ni-MH selladas son:



En el caso de las baterías de Ni-MH selladas, el oxígeno que se produce en el electrodo positivo se consume en la aleación metálica (electrodo negativo) produciéndose agua. Al igual que las baterías de Ni-Cd selladas cuando se supera determinada presión interna los gases se expulsan al exterior a través de válvulas de seguridad.

La posibilidad de recombinar los gases que se producen durante la sobrecarga en las baterías selladas, evita la pérdida de parte del electrolito a través de su descomposición en oxígeno e hidrógeno. Al no permitirse la fuga de gases del interior de la batería y producirse nuevamente agua debido a la recombinación, las baterías necesitan cada vez menos mantenimiento, un aspecto positivo a tener en cuenta [99].

Sin embargo, lo que en principio es una ventaja de las baterías selladas se convierte en un serio inconveniente cuando se requiere aplicar razones de carga elevadas para disminuir los tiempos de recarga. Las reacciones de recombinación de gases que se producen en las baterías selladas son de naturaleza exotérmica y producen calor. Por tanto, las baterías selladas requieren de un control más preciso de la

temperatura ya que cuando se encuentran próximas a la zona de plena carga pueden sufrir un aumento importante de la temperatura, fundamentalmente cuando se recargan con razones de corriente altas.

Además, aún cuando los fabricantes trabajan intensamente por mejorar los procesos de recombinación de gases, cuando se aplican razones de carga elevadas la producción de gases supera a la capacidad de recombinación y las baterías liberan al exterior los gases a través de válvulas de seguridad de forma parecida al caso de las baterías abiertas. Por tanto, las baterías selladas tienen menor capacidad para asimilar carga rápida quedando limitada la eficiencia de las reacciones de recombinación de gases por la razón de carga utilizada.

En las baterías abiertas, existe una barrera que impide el intercambio de gases entre los electrodos de cada celda y por tanto, no se produce el proceso de recombinación, lo que aporta un control adicional de la temperatura (no se genera calor, debido a reacciones de recombinación). Por tanto, las baterías abiertas ofrecen un comportamiento mejor (bajo procesos de carga rápida) que las baterías selladas y resultan más idóneas para trabajar bajo regímenes cíclicos de carga-descarga. Manteniendo un control adecuado del funcionamiento de la batería abierta durante la carga se puede evitar la entrada en sobrecarga, minimizándose las pérdidas de agua y la posible degradación de sus características.

Por tanto, las baterías utilizadas en este trabajo para realizar las pruebas de carga rápida fueron:

➤ Baterías de Ni-Cd

Baterías de Ni-Cd abiertas, en concreto 6 módulos STM 5.100 de SAFT (6 V/módulo, 100 Ah).

➤ Baterías de Ni-MH

Baterías de Ni-MH selladas, en concreto 6 módulos NH 12.4 de SAFT (12 V/módulo, 108 A-h).

Aún cuando las baterías abiertas tienen capacidad para soportar mayores sobrecargas que las baterías selladas, ha sido imposible encontrar en el mercado baterías abiertas de Ni-MH. La utilización del hidrógeno como parte principal del material activo de estas baterías, hace necesario sellar el contenedor de la batería para que este gas no escape durante el proceso de carga. Por este motivo, las baterías de Ni-MH escogidas para realizar las pruebas de carga rápida son baterías selladas. De todas formas hay que destacar que aunque se denominan selladas, porque permiten la recombinación de gases en su interior, estas baterías liberan al exterior los gases producidos en sobrecarga de forma muy parecida a lo observado en baterías de Ni-Cd abiertas. La liberación de gas se realiza a través de las válvulas de seguridad que están preparadas para abrirse una vez alcanzada determinada presión interna [15][20][90][96].

➤ Otras baterías utilizadas para diferentes estudios

Además del estudio de las características de cada tecnología a través de la literatura técnica revisada y de las especificaciones aportadas por los fabricantes [111][112], se han realizado cientos de ensayos con diferentes tipos de baterías de diferentes capacidades nominales. Estos ensayos constituyen la base experimental del conocimiento previo necesario para realizar un exhaustivo análisis del comportamiento de las baterías bajo diferentes condiciones de funcionamiento (especialmente para carga rápida, debido a la poca información existente).

Un ejemplo de la importancia de los estudios realizados previamente en diferentes baterías es la posibilidad de definir una metodología que permita la realización de ensayos definitivos en las baterías escogidas para este trabajo (estudio de comportamiento en carga, especialmente carga rápida).

3.3 OBJETIVOS DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS

El comportamiento de una batería bajo condiciones específicas de funcionamiento se determina a través de procedimientos bien definidos y con objetivos muy concretos. El conjunto de procedimientos a través de los cuales se lleva a cabo la

experimentación constituye la metodología de ensayos. A través de la metodología de ensayos se traza el camino a seguir para lograr los objetivos de investigación propuestos dentro del proceso de experimentación.

La necesidad de desarrollar una metodología de ensayos para el estudio de los procesos de carga, especialmente de carga rápida, en las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad proviene de que:

- ◆ Actualmente no existe una metodología bien definida para el estudio del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad, especialmente cuando se aplican regímenes de carga elevados. En este sentido solo se detallan procedimientos muy específicos para la comprobación de una determinada característica funcional marcada por el fabricante [114].

Hay que tener en cuenta que las baterías de media y gran capacidad en estudio pertenecen a tecnologías avanzadas a diferencia de las baterías tradicionales de plomo-ácido.

El objetivo fundamental de la metodología de ensayos utilizada en esta tesis es:

- Establecer un método de trabajo que permita estudiar de forma fiable el comportamiento en carga (desde carga lenta hasta carga rápida) de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad, con el fin de proponer soluciones que permitan reducir significativamente el tiempo de carga.

Una vez establecido el objetivo principal de la metodología de ensayos, se van a definir los pasos a seguir para alcanzar dicho objetivo:

- 1) Estudio de la evolución de las principales variables que intervienen en el proceso de carga a corriente constante (tensión, temperatura, producción de gases) cuando se utilizan diferentes razones de carga (desde carga lenta hasta carga rápida).

- 2) Determinación de la razón de carga óptima para realizar la recarga de la batería en función de la evolución de las principales variables que intervienen en el proceso de carga y de determinados índices de comportamiento como son la aceptación de carga y la eficiencia energética.
- 3) Determinación del instante en que debe finalizar la carga de la batería para garantizar su funcionamiento óptimo, de forma que se proporcione a la batería la máxima capacidad en el menor tiempo posible y se minimicen los efectos de la sobrecarga.
- 4) Estudio de las variaciones que tienen lugar en la evolución de las variables que intervienen en el proceso de carga, en los índices de comportamiento de la batería, en la razón de carga óptima y en el instante adecuado de finalización de la carga cuando se trabaja a diferentes temperaturas.

Para cumplir los objetivos de la investigación es necesario definir un conjunto de procedimientos estándares que proporcionen una base común que permita comparar los resultados de los ensayos realizados para evaluar el comportamiento durante la carga de las baterías escogidas para la investigación, ya sea de Ni-Cd o de Ni-MH. Así, habrá que considerar los siguientes puntos:

- Realizar una inspección visual de las baterías en el momento de recibirlas en el laboratorio, con el fin de detectar cualquier anomalía como pueden ser, posibles derrames de electrolito o golpes sufridos durante su transporte.
- Proceder a la identificación de cada una de las baterías, de forma que se facilite la organización de toda la información recogida a través de la experimentación.
- Disponer de medios que garanticen un ambiente a temperatura controlada.

- Disponer del hardware y del software adecuado para la realización de los experimentos (cargadores, descargadores, sistemas de adquisición de datos, ordenador personal, software de control, etc.).
- Disponer de elementos de medida que permitan conocer la evolución de las principales variables que intervienen en el proceso de carga (tensión, corriente, temperatura y producción de gases).
- Realizar los correspondientes ciclos de acondicionamiento según las recomendaciones del fabricante. De esta forma, se logra la estabilización del comportamiento de las baterías nuevas una vez que éstas se ponen en servicio.
- Definir las características de partida de cada batería bajo determinadas condiciones estándares de funcionamiento. Estas características de partida constituyen las referencias de comparación cuando la batería se somete a condiciones de funcionamiento distintas de las condiciones de partida.
- Realizar repetidos ciclos de carga-descarga en cada batería utilizando diferentes razones de carga (desde carga lenta hasta carga rápida) y a temperatura ambiente de 23 °C. Evaluar el comportamiento de las baterías en cada caso.
- Realizar repetidos ciclos de carga-descarga en cada batería utilizando diferentes razones de carga y a diferentes temperaturas de funcionamiento. Evaluar el comportamiento de las baterías en cada caso.
- Recoger y almacenar de forma organizada toda la información sobre la evolución en el tiempo de las principales variables que intervienen en el proceso de carga-descarga de la batería (tensión, temperatura y producción de gases).
- Realizar el tratamiento estadístico de toda la información recogida y almacenada con el fin de extraer conclusiones sobre el comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad.

Para dar respuesta a todas las necesidades que plantea el desarrollo de la metodología de ensayos, se requiere una herramienta que permita realizar de forma automática cualquier tipo de propuesta experimental en condiciones totalmente controladas con precisión, fiabilidad y seguridad: el banco de ensayos.

3.4 EL BANCO DE ENSAYOS

El cumplimiento de los objetivos de la investigación y el desarrollo de la metodología establecida para lograr dichos objetivos solo es posible si se dispone de un banco de ensayos que posibilite el control fiable de todas las variables que intervienen en los procesos de carga-descarga de las baterías. La figura 3-1 muestra el diagrama de bloques de los bancos de ensayos utilizados.

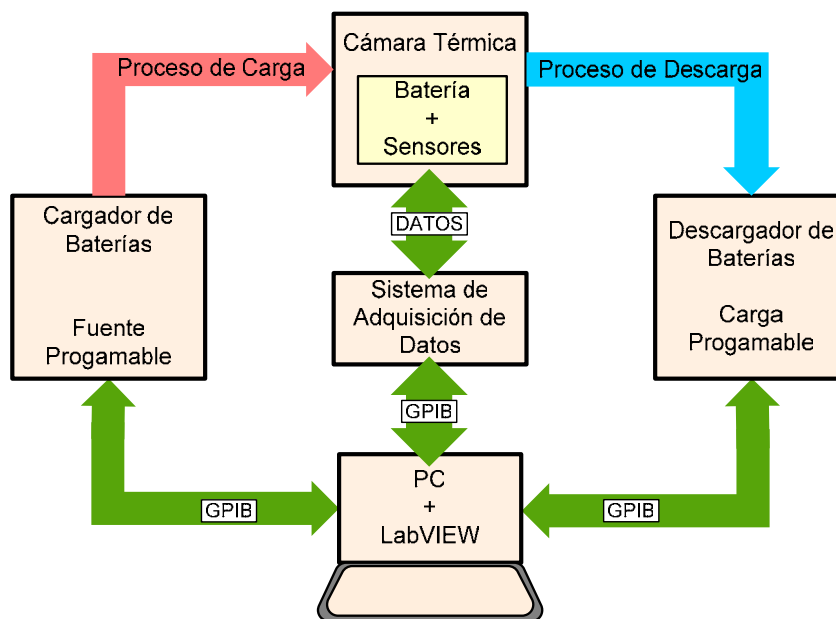


Figura 3-1. Diagrama de bloques de los bancos de ensayos utilizados para el estudio del comportamiento de las baterías.

Básicamente, los bancos de ensayos empleados se componen de los siguientes elementos:

- Una cámara térmica mediante la cual se controla la temperatura ambiente en cada ensayo.

El comportamiento de las baterías depende de la temperatura de funcionamiento. En el capítulo 2 se muestran algunas de las variaciones en el comportamiento de las baterías cuando trabajan a diferentes temperaturas como por ejemplo, la modificación de su resistencia interna. Por este motivo, es necesario controlar la temperatura ambiente para obtener resultados fiables del comportamiento de las baterías cuando se someten a diferentes razones de carga.

- Un cargador de baterías que proporciona una corriente de carga constante y que permite la selección de la magnitud de la corriente de carga de forma automática y en un amplio margen. El cargador de baterías debe poder comunicarse con el resto del sistema de forma que se pueda realizar la transferencia de datos entre el sistema de control y el cargador.
- Un descargador de baterías que permite la descarga a corriente constante y la selección de la magnitud de la corriente de descarga de forma automática en un margen amplio. El descargador se comunica con el resto del sistema de forma que se pueda realizar la transferencia de datos entre el sistema de control y el descargador.
- Un grupo de sensores que permiten medir en cada instante el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de carga-descarga de la batería. Fundamentalmente, se requieren sensores de temperatura, sensores de presión y sensores de detección de gases, específicamente de hidrógeno. También se realizan medidas de tensión y de corriente durante los procesos de carga-descarga de las baterías.
- Un sistema de adquisición de datos que permite el acondicionamiento de las señales procedentes de los diferentes sensores y su canalización hacia un ordenador personal que procesa, representa y almacena la información recibida.

- Un ordenador personal con un software de control que gobierna los equipos del banco de ensayos. El ordenador personal más el software constituyen el sistema de control centralizado, que tiene la tarea de controlar, supervisar y proteger toda la actividad desarrollada en el banco de ensayos, así como de representar y almacenar toda la información recogida para su posterior análisis.
- Un sistema de comunicación fiable que permite la interconexión de todos los elementos que componen el banco de ensayo.
- Un software específico de tratamiento de datos que posibilita la representación (de forma rápida y fiable) de la evolución de cualquier variable que se requiere y además, el análisis de los ficheros de datos generados durante cada uno de los ensayos realizados.
- Un sistema de protección por hardware que asegura el funcionamiento del banco de ensayos aún cuando se produzcan averías en la ejecución del programa de control desarrollado o simplemente, fallos en el sistema operativo utilizado.

3.4.1 Implementación del banco de ensayos

3.4.1.1 Equipamiento

El equipamiento utilizado para realizar los ensayos de laboratorio se escogió en función de los objetivos de investigación propuestos, de los requerimientos de la metodología de ensayos y de la experiencia previa sobre la experimentación con baterías. Esta experiencia previa está avalada por cientos de experimentos (fundamentalmente de carga rápida) realizados con baterías de baja capacidad y con baterías de media y gran capacidad [41][43][68].

Los equipos utilizados en los bancos de ensayos se describen a continuación:

- Equipos destinados al mantenimiento de la temperatura de trabajo.
 1. Armario térmico con regulación electrónica ICP-800

- Capacidad de 749 l.
- Regulación de temperatura desde 0 °C hasta +60 °C ($\pm 0,1$ °C).
- Software de control y puerto de comunicación RS-232.
- Protección por temperatura límite.

2. Cámara climática con regulación electrónica desarrollada específicamente para los bancos de ensayos.

- Capacidad de 8000 l.
- Regulación de temperatura desde -20 °C hasta +60 °C ($\pm 0,5$ °C).
- Software de control y puerto de comunicación RS-232.
- Evacuación de los gases producidos durante la sobrecarga de las baterías.

➤ Equipos utilizados para la carga de las baterías [108][113].

1. Fuente de alimentación programable de corriente continua HP 6681A

- Tensión de salida: 0 – 8 V.
- Corriente de salida: 0 – 580 A.
- Estándar de comunicación IEEE-488.

2. Fuente de alimentación programable de corriente continua HP 6684A.

- Tensión de salida: 0 – 40 V.
- Corriente de salida: 0 – 128 A.
- Estándar de comunicación IEEE-488.

3. Fuente de alimentación programable de corriente continua Sorensen DHP60-220M1M9D

- Tensión de salida: 0 – 60 V.
- Corriente de salida: 0 – 220 A.
- Estándar de comunicación IEEE-488.

➤ Equipos utilizados para la descarga de las baterías [106].

1. Carga electrónica programable HP 6050A.

- Potencia máxima: 1800 W.
- Estándar de comunicación IEEE-488.

➤ Equipos utilizados para la adquisición de datos [107][105].

1. Sistema de adquisición de datos HYDRA 2620A.

2. Sistema de adquisición de datos HP 34970A.

➤ Equipos utilizados para la supervisión y el control del banco de ensayos [109][110].

1. Ordenador personal.

2. Software de programación gráfica LabVIEW.

3. Cables de comunicación GPIB.

➤ Sensores utilizados para la realización de medidas.

1. Sensores de temperatura.

2. Sensores de presión.

3. Sensores de hidrógeno.

➤ Dispositivos de protección por hardware del banco de ensayos.

1. Protección de tensión mínima en la descarga.
2. Protección de temperatura máxima durante la carga.

Los elementos de medida son una parte fundamental del banco de ensayos ya que a través de éstos, se recoge de forma directa toda la información requerida sobre el comportamiento de la batería. Por este motivo, los sensores empleados se describen en el apartado siguiente.

3.4.1.2 Medidas realizadas durante los ensayos

A continuación, se describen las características de las medidas realizadas durante este trabajo:

➤ Tensión de la batería

La tensión de la batería se mide directamente en sus terminales, a través de uno de los canales del sistema de adquisición de datos. El dato se transfiere al PC y se almacena cada determinado intervalo de tiempo. Para razones de carga o descargas inferiores a 2,0C así como para los tiempos de reposo se utiliza un periodo de muestreo de 30 segundos y para razones de carga de 2,0C o superiores se utiliza un periodo de muestreo de 10 segundos. Estos periodos de muestreo se han seleccionado de forma que no se pierda ninguna información útil acerca de la evolución de las variables en estudio.

➤ Corriente de la batería

Tanto la carga como la descarga de las baterías en los ensayos realizados se desarrollan a corriente constante. Los equipos escogidos para la carga y la descarga de las baterías brindan con una precisión adecuada la medida de este parámetro. Por este motivo, el valor de la corriente se obtiene directamente de los equipos a través de comunicación GPIB [106][108][113].

➤ La temperatura de la batería

Básicamente, la forma en que se evacua el calor generado en el interior de las baterías durante la carga y la descarga es mediante conducción térmica [15]. En función del diseño constructivo y de los materiales empleados en el proceso de fabricación, las baterías presentan una menor o mayor conductividad térmica desde los puntos más calientes en el interior de la batería hasta la parte más externa de su contenedor. En ocasiones, para evacuar el calor producido se utilizan sistemas de refrigeración, por aire o líquido.

La medida de temperatura en la carcasa de la batería puede conducir a resultados erróneos cuando evoluciona de forma rápida en el tiempo, como ocurre por ejemplo cuando se aplica carga rápida. En estos casos, las diferencias de temperatura que se producen debido a la conductividad térmica del material usado como contenedor, pueden llegar a ser importantes y por tanto la medida de temperatura realizada en el exterior no representa la evolución real de la temperatura en el interior de la batería.

La figura 3-2 muestra la forma en que se evacua el calor desde el interior de la batería. Este fenómeno se observó fundamentalmente en las baterías de Ni-MH, donde las reacciones de carga son exotérmicas y generan mucho calor aún cuando las razones de carga aplicadas no sean demasiado altas.

Una opción para realizar una medida de temperatura más fiable en el caso de baterías de media y gran capacidad bajo procesos de carga rápida, es medir la temperatura ubicando un sensor en la pletina metálica usada para la conexión eléctrica entre las celdas que forman la batería, si es que están accesibles.

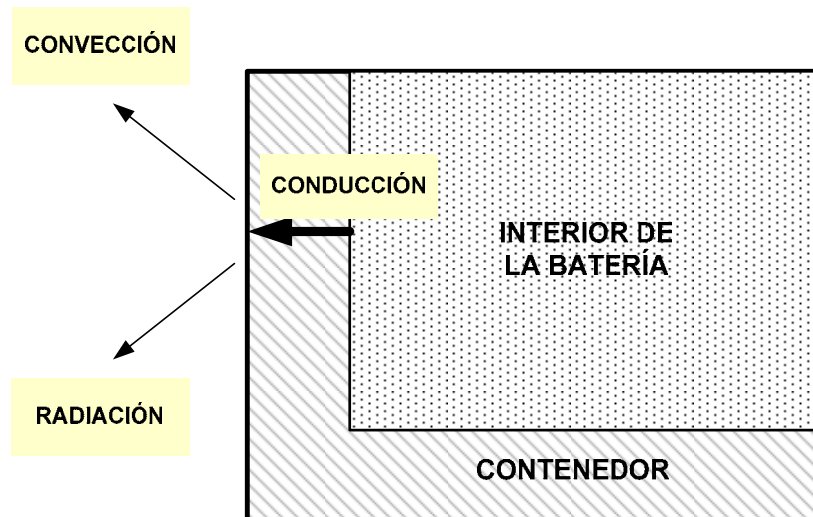


Figura 3-2. Evacuación del calor producido en el interior de una batería.

Como ejemplo, en la figura 3-3 se muestra la diferencia entre las medidas de temperatura realizadas en dos puntos distintos de una batería de Ni-MH. Uno de los sensores se ubicó en la unión metálica de la celda que se encuentra en el centro del módulo (la más caliente) y el otro sensor se colocó en la carcasa de la batería. Este último muestra un incremento menor de la temperatura, siendo de aproximadamente 2 °C la diferencia entre las medidas de ambos sensores al final de la carga realizada a 0,1C.

En la figura 3-4 se observa cómo aumenta la diferencia entre la medida realizada en la carcasa de la batería y la realizada en la unión metálica de la celda situada en el centro de la batería cuando se incrementa la razón de carga aplicada a 1,0C. Al final del proceso de carga la diferencia entre ambas medidas es de aproximadamente 20 °C, lo que invalida la medida realizada en la carcasa.

Por este motivo, la medida de temperatura en las baterías de Ni-MH se realizó siempre en el punto más representativo accesible, es decir, en la unión metálica de la celda situada en el centro de la batería.

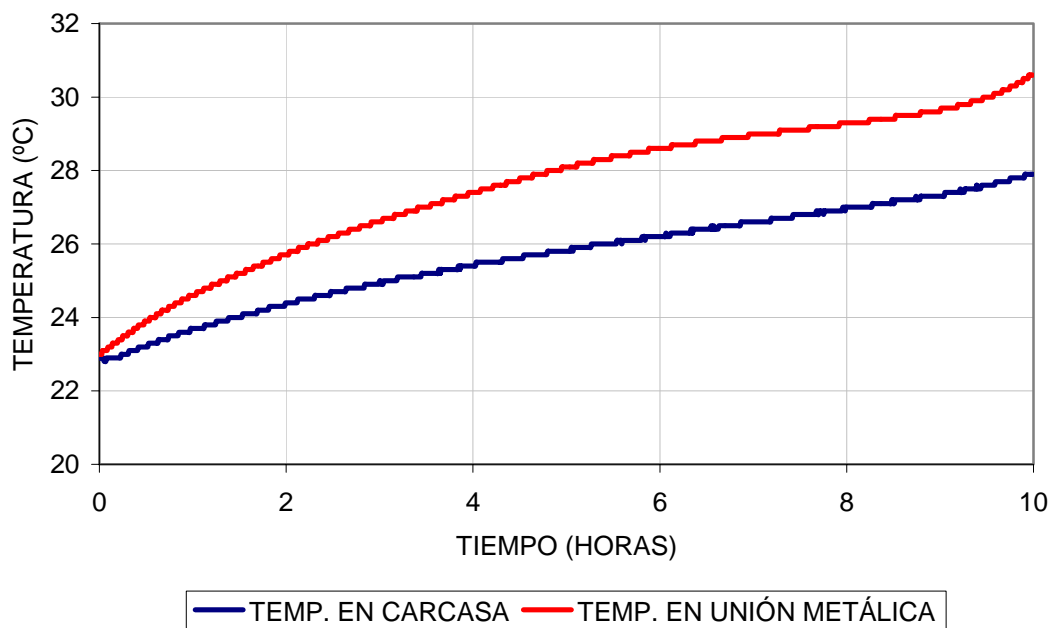


Figura 3-3. Evolución de la temperatura en la carcasa de la batería y en la unión metálica de la celda central de una batería de Ni-NH cuando se realiza la carga a 0,1C y a temperatura ambiente de 23 °C.

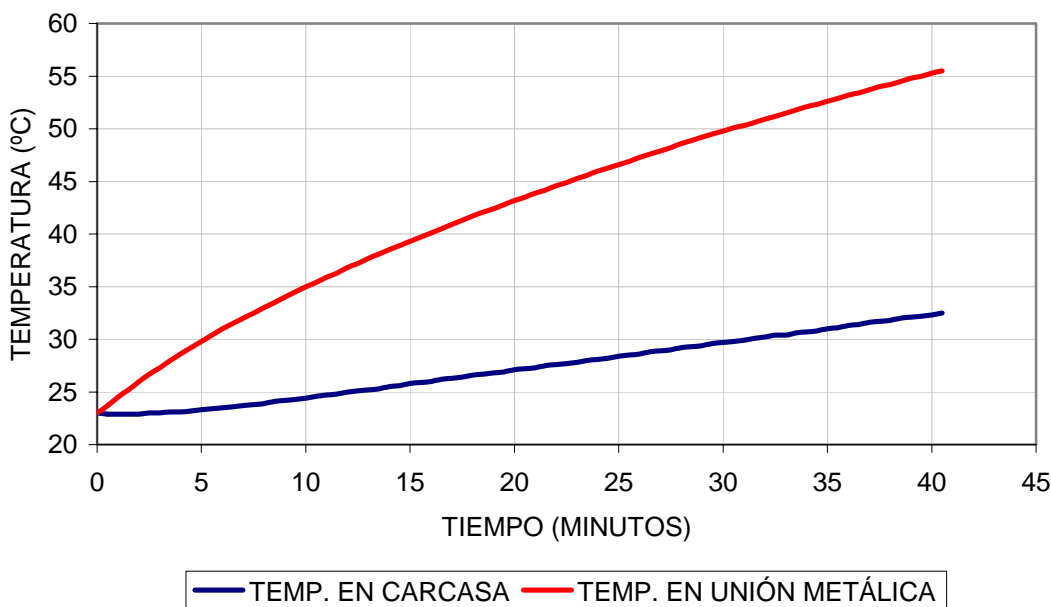


Figura 3-4. Evolución de la temperatura en la carcasa de la batería y en la unión metálica de la celda central de una batería de Ni-NH cuando se realiza la carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 23 °C.

En baterías de Ni-Cd, donde el calor producido durante la carga es mucho menor que en el caso de baterías de Ni-MH, se ha comprobado que la influencia de este fenómeno es claramente menor. De ahí que en esta tecnología resulte válida la medida de temperatura en la carcasa de la batería, lo que resuelve muchos problemas ya que en la mayoría de los casos el diseño constructivo de la batería no permite otras posibilidades [41]. La figura 3-5 muestra uno de los sensores utilizados para realizar la medida de temperatura, se trata de un elemento PT100 (-50 °C a +260 °C).

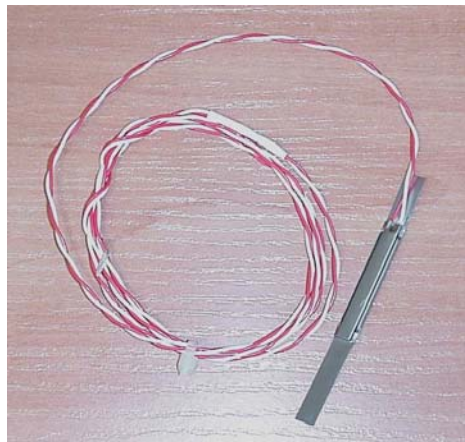


Figura 3-5. Sensor de temperatura tipo PT100 utilizado en los ensayos.

➤ Detección de hidrógeno durante la entrada en sobrecarga de la batería

El objetivo de la utilización de sensores de hidrógeno, es detectar la presencia de este gas producido por la batería cuando entra en sobrecarga. La medida de hidrógeno se realiza a través de un sensor de alta sensibilidad que se sitúa próximo a las válvulas de seguridad de las baterías.

En la figura 3-6 se muestra el sensor TGS 821 (FIGARO USA, INC.) utilizado para la detección de hidrógeno [41]. Las principales características de este sensor son:

- Alta sensibilidad y selectividad al hidrógeno (puede detectar concentraciones tan bajas como 50 ppm).
- Baja conductividad en aire limpio.
- Medidas repetibles.

- Alta estabilidad.
- Circuito eléctrico muy simple.



Figura 3-6. Sensor de hidrógeno TGS 821 de FIGARO USA, INC.

El circuito eléctrico utilizado para la medida de hidrógeno es muy sencillo como se puede apreciar en la figura 3-7.

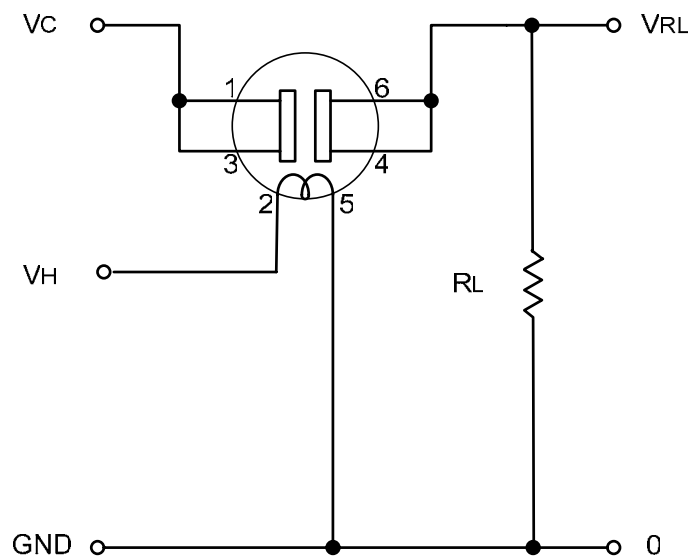


Figura 3-7. Circuito básico de medida del sensor de hidrógeno TGS 821 de FIGARO USA, INC.

En las tablas 3-1 y 3-2 se muestran los principales parámetros que deben tenerse en cuenta para el correcto funcionamiento del sensor y las principales características eléctricas de este dispositivo.

	SÍMBOLO	VALORES	COMENTARIO
TENSIÓN DE LA RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO	VH	5.0±0.2V	AC o DC
TENSIÓN DE ENTRADA DEL CIRCUITO	VC	Max. 24V	AC O DC PS≤15mW
RESISTENCIA DE CARGA	RL	Variable	PS≤15mW

Tabla 3-1. Parámetros de funcionamiento del sensor de hidrógeno TGS 821.

	SÍMBOLO	CONDICIÓN	ESPECIFICACIONES
RESISTENCIA DEL SENSOR	RS	Hidrógeno a 100ppm/aire	1kΩ ~ 10kΩ
RAZÓN DE CAMBIO DE LA RESISTENCIA DEL SENSOR	α	$\frac{\text{Log}[Rs(H_2,100\text{ppm})/Rs(H_2,1000\text{ppm})]}{\text{Log}(1000\text{ppm}/100\text{ppm})}$	0.6 ~ 1.20
RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO	RH	Temperatura Ambiente	38.0 ± 3.0Ω
POTENCIA DISIPADA	PH	VH = 5.0V	660 ± 55mW

Tabla 3-2. Características eléctricas del sensor de hidrógeno TGS 821.

En la figura 3-8 se muestra una de las baterías de Ni-Cd utilizadas durante los ensayos de laboratorio en la cual, se puede observar la ubicación de los sensores de hidrógeno y de temperatura.

En las figuras 3-9 y 3-10 se muestran los dos bancos de ensayos utilizados para la realización de este trabajo.

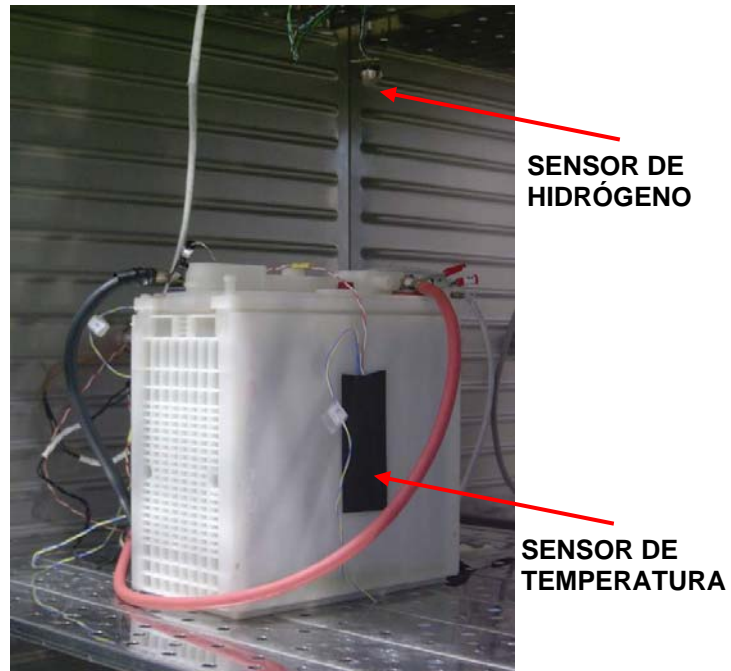


Figura 3-8. Ubicación de los sensores de temperatura y de hidrógeno en un ensayo realizado con una batería de Ni-Cd.



Figura 3-9. Banco de ensayos N°1 del laboratorio de baterías.



Figura 3-10. Banco de ensayos N°2 del laboratorio de baterías.

3.4.1.3 El software de control del banco de ensayos

La potencialidad máxima del banco de ensayos depende en gran medida del software que se utilice y del programa específico que se diseñe ya que condiciona la flexibilidad de la programación de los diferentes tipos de ensayos.

Por este motivo, los bancos de ensayos empleados disponen de programas que permiten definir los ensayos de forma flexible, controlar su realización, así como visualizar y analizar los resultados obtenidos. El software comercial utilizado para el desarrollo de los programas de los bancos de ensayos es el software de programación gráfica LabVIEW de National Instruments. Este software se utiliza ampliamente en el control de procesos industriales y ofrece una alta flexibilidad y fiabilidad.

Las herramientas de software desarrolladas para los bancos de ensayos se describen a continuación [116][118]:

- Programa para la configuración, control de la ejecución y supervisión de los ensayos.

Este programa permite el funcionamiento de los bancos de ensayos con diferentes equipos (fuentes de alimentación, cargas electrónicas, sistemas de adquisición de datos, etc.), registra diferentes medidas procedentes de los sensores acoplados al sistema de adquisición de datos, establece la secuencia de ejecución del ensayo de forma condicional (se pueden establecer condiciones que modifican el flujo de ejecución de los ensayos en base a cualquier dato capturado), etc. En definitiva, este programa se encarga del control total de las condiciones de los ensayos.

La ventana principal del programa de ensayos mostrada en la figura 3-11 presenta toda la información relativa al ensayo.

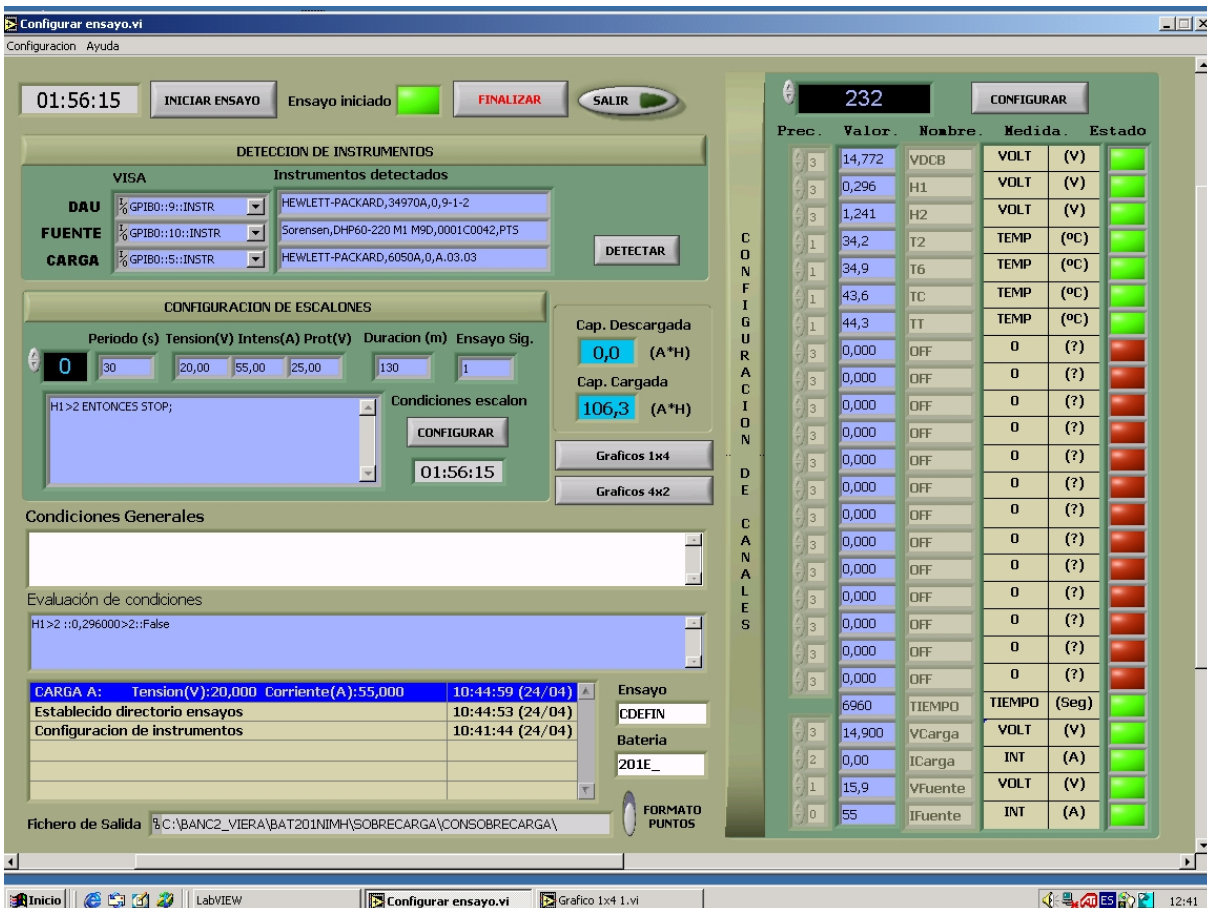


Figura 3-11. Pantalla principal del programa de control del banco de ensayos.

En esta ventana se pueden realizar las siguientes funciones:

- Detección de los equipos del banco de ensayos.

- Configuración de los equipos y de los canales del sistema de adquisición de datos.
- Configuración de la secuencia de operaciones y de los parámetros de las mismas que deben ejecutarse en cada ensayo o grupos de ensayos (tiempo de muestreo, corriente de carga, corriente de descarga, tiempo de reposo, condición de salto, próxima acción a ejecutar, etc.).
- Establecimiento de las condiciones generales del ensayo que se refieren fundamentalmente a la implementación de protecciones por software.
- Configuración de los nombres de los ficheros de datos y de su ubicación.

Además, desde esta ventana se accede a las gráficas que muestran la evolución en el tiempo de las variables captadas por el banco de ensayos (ver figura 3-12).

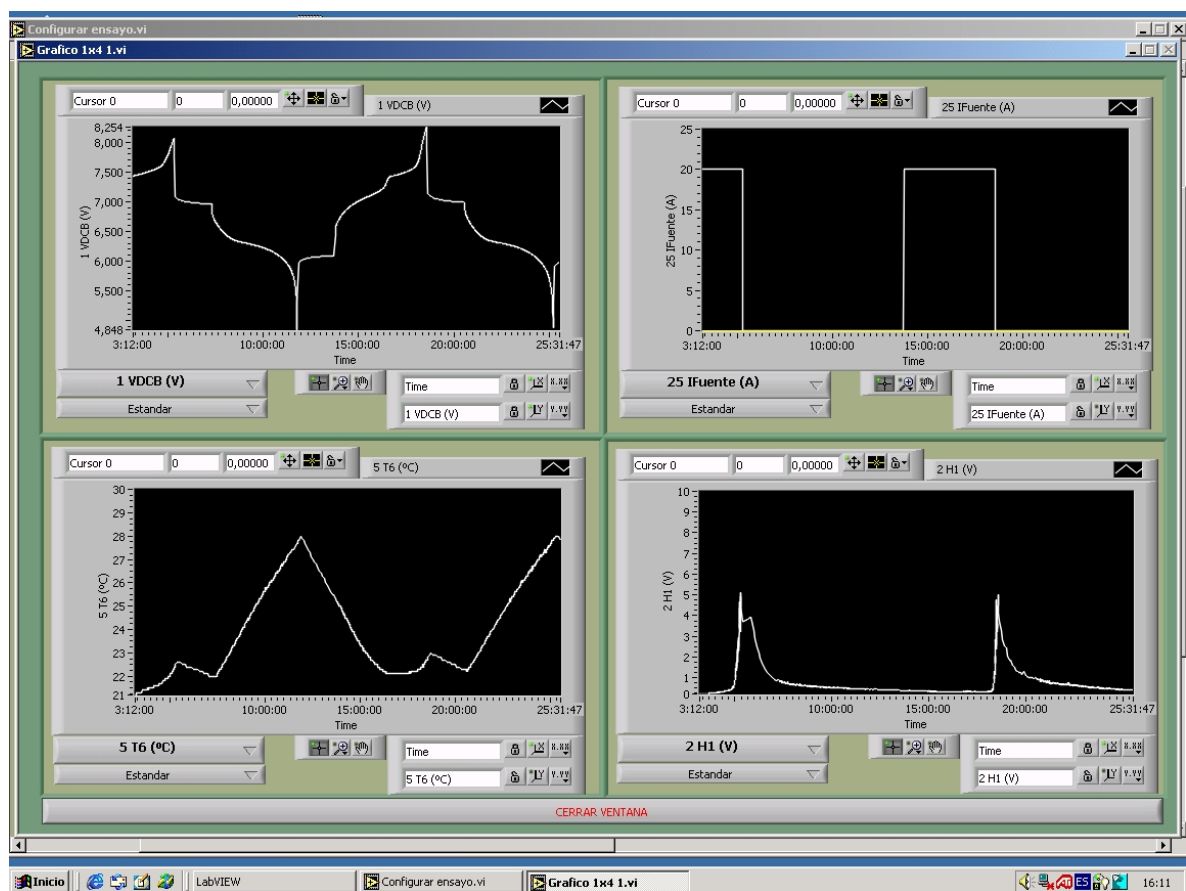


Figura 3-12. Visualización de gráficas durante la ejecución de los procesos de carga-descarga de baterías.

- Programa para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante la realización de los ensayos.

Este programa permite la visualización de los datos obtenidos durante el ensayo, su procesamiento y análisis, así como la exportación de los datos a otras aplicaciones comerciales de análisis estadístico o de procesamiento de textos (Excel, Word, etc.). A través de este programa, se facilita el tratamiento de los datos y la conversión de los ficheros obtenidos. Este análisis se realiza posteriormente al ensayo o grupos de ensayos. Con esta herramienta se pueden cargar simultáneamente ficheros de diferentes ensayos, permitiendo así comparar la evolución de los parámetros de la batería en diferentes regímenes o diferentes baterías cuando se someten a un mismo régimen de carga-descarga. También se puede visualizar diferentes gráficas de un mismo ensayo, superpuestas en el tiempo, para observar la variación de los diferentes procesos ejecutados durante el ensayo.

- Programa de monitorización y supervisión remota del ensayo a través de Internet.

A través de este software se puede visualizar la evolución del ensayo de forma remota, evitándose la necesidad de la presencia del usuario en el banco de ensayos físico.

El software desarrollado permite, seguir remotamente un ensayo a través del protocolo TCP/IP usado en Internet. En este caso es necesario conectarse desde un equipo remoto al equipo controlador del banco de ensayos y seleccionar las variables a visualizar. Se dispone de varios tipos de gráficas:

- Gráficas simples en las que el usuario puede observar la evolución de una variable y obtener su derivada o integral.
- Gráficas múltiples en las que el usuario puede visualizar varias variables en una misma gráfica.

Teniendo en cuenta que la realización de un ensayo determinado puede durar días en funcionamiento ininterrumpido y que el laboratorio donde se instalan los bancos de ensayos presenta un ambiente ruidoso al alojar los equipos de potencia y las cámaras térmicas, resulta inadecuado situar en este lugar el puesto de trabajo.

En estas condiciones, el seguimiento remoto a través de Internet supone una gran ventaja al permitir al usuario visualizar los ensayos desde su puesto de trabajo habitual, oficina, casa o cualquier lugar con conexión a Internet, sin necesidad de estar presente en el laboratorio donde se encuentra el banco de ensayos.

3.5 METODOLOGÍA DE ENSAYOS DESARROLLADA PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE CARGA RÁPIDA EN BATERÍAS DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD

3.5.1 Ciclos de acondicionamiento

Una batería nueva puede ver incrementada su capacidad durante los primeros ciclos de trabajo por lo que es necesario realizar varios ciclos de acondicionamiento antes de empezar los ensayos, si se desean obtener datos fiables y repetibles sobre el comportamiento nominal de la batería.

Además, el primer conjunto de ciclos está destinado a confirmar el funcionamiento satisfactorio de la batería bajo condiciones nominales de trabajo; si la batería no cumple con las especificaciones de los fabricantes, no tiene sentido continuar estudiando su comportamiento.

Las características principales que son objeto de análisis para determinar el funcionamiento correcto de las baterías son la evolución de la tensión, de la temperatura, la capacidad nominal, la aceptación de carga y la eficiencia energética. Una vez que se comprueba el funcionamiento correcto de la batería se puede

comenzar con los ensayos requeridos para el estudio de su respuesta ante procesos de carga a regímenes más elevados.

Las condiciones de funcionamiento establecidas para realizar los ciclos de acondicionamiento son:

- Condiciones utilizadas para realizar la carga de las baterías durante los ciclos de acondicionamiento.

- Temperatura ambiente de 23 °C.

La temperatura de 23 °C es la que utilizan usualmente los fabricantes para especificar las características técnicas de sus productos.

- Carga a corriente constante utilizando una razón de carga de 0,1C.

La carga a corriente constante (0,1C) es la recomendada por los fabricantes de baterías para la realización de los ciclos de acondicionamiento. La carga a corriente constante es la forma más adecuada de realizar la carga de baterías de Ni-Cd y de Ni-MH.

- Finalización de la carga en función de la capacidad suministrada a la batería.

El proceso de carga se detiene una vez que se alcanza el porcentaje de sobrecarga fijado, según los fabricantes entre un 30 y un 40 por ciento en el caso de baterías de Ni-Cd y aproximadamente un 10 por ciento en el caso de las de Ni-MH.

- Condiciones utilizadas para realizar la descarga de las baterías durante los ciclos de acondicionamiento.

- Temperatura ambiente de 23 °C.

- Descarga a corriente constante utilizando una razón de descarga de 0,2C.

Después de experimentar con diferentes razones de descarga se escoge la razón de descarga de 0,2C. La utilización de esta razón de descarga permite minimizar los efectos que tiene el proceso de descarga en un ciclo completo de carga-descarga, permitiendo un análisis más preciso de las características durante la carga, que es el objetivo principal de este estudio. Además, esta razón de descarga es habitualmente usada por los fabricantes para definir la capacidad nominal de la batería [48].

Aún cuando las baterías aceptan razones de descarga superiores a 0,2C, incluso 1,0C, el ciclo completo de carga-descarga se ve afectado por las condiciones en que se realiza la descarga y se enmascaran de cierto modo determinados fenómenos asociados al proceso de carga, que es el principal objetivo de este trabajo. Además, el incremento de temperatura que se produce debido al aumento de la razón de descarga es mayor y por tanto el tiempo que se necesita para restablecer las condiciones de funcionamiento de partida se incrementa considerablemente (fundamentalmente la temperatura de la batería).

- Finalización de la descarga cuando la tensión por celda desciende de 1 V/celda.

La velocidad de disminución de la tensión de la batería durante la descarga por debajo de 1 V/celda es elevada y por tanto, a partir de este punto no se incrementa prácticamente la capacidad que puede ser descargada de la batería. Finalizando la descarga cuando la tensión desciende a 1 V/celda, la capacidad descargada es prácticamente el 100 por ciento de la capacidad nominal de la batería (100 por ciento de profundidad de la descarga).

Si se escoge una tensión de finalización de la descarga por encima de 1 V/celda se corre el riesgo de dejar sin descargar cierta capacidad residual (parte del material activo no se convierte) y los resultados de los ensayos pueden verse afectados por una pérdida transitoria de la

capacidad, más aún cuando en condiciones de laboratorio un mismo tipo de ensayo se repite decenas de veces bajo unas condiciones específicas. Las baterías de Ni-Cd se ven más afectadas por este fenómeno (relacionado con el “efecto memoria”) que las baterías de Ni-MH, tal y como se muestra en el capítulo 2.

Sin embargo, cuando la finalización de la descarga se produce por debajo de 1 V/celda se corre el riesgo de inversión de la polaridad de la batería, con los consiguientes efectos negativos que esto supone para la vida cíclica de la batería (ver capítulo 2).

La utilización de unas condiciones estándares durante la descarga de la batería posibilita minimizar la influencia de este proceso cuando se estudia el comportamiento de la batería en carga. Por tanto, las condiciones de funcionamiento descritas para la descarga se han aplicado en todos los ensayos realizados, excepto en aquellos donde se especifica alguna modificación.

- Tiempo de reposo entre los procesos de carga-descarga durante los ciclos de acondicionamiento.

La temperatura de funcionamiento de la batería es una variable que tiene una marcada influencia sobre su comportamiento. Por tanto, la carga o la descarga no se inician hasta que la temperatura de la batería se estabiliza en 23 °C, una vez que ha aumentado debido a un proceso anterior de descarga o carga respectivamente. Hay que destacar que el tiempo necesario para restablecer la temperatura en cada prueba es un elemento que introduce una demora importante.

En la figura 3-13 se pueden observar dos ciclos seguidos de carga-descarga en una batería de Ni-MH. En este caso la carga se realiza a 0,1C y la descarga a 0,2C y la temperatura inicial de la batería en cada ciclo es 23 °C. La carga se detiene cuando se detecta hidrógeno producto de la sobrecarga y la descarga se finaliza cuando la tensión desciende a 1 V/celda. Como se

puede observar en la figura 3-13, un ensayo de carga-descarga puede tardar mucho más de 24 horas en las condiciones de funcionamiento descritas. Esto incrementa significativamente el coste de los ensayos y es uno de los motivos fundamentales por los que existe poca información al respecto.

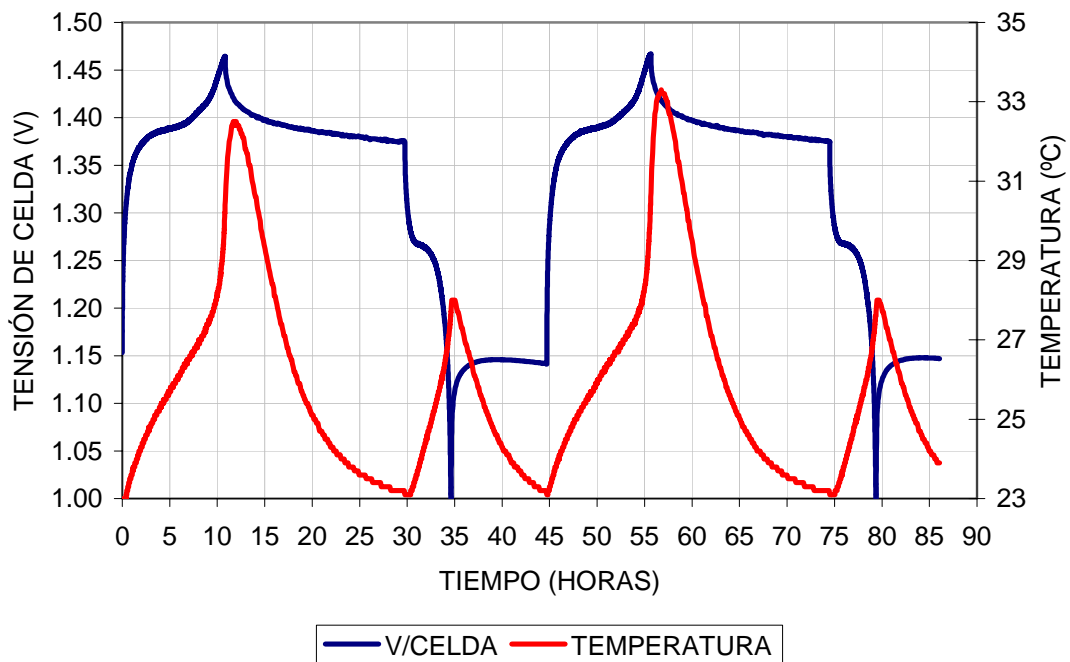


Figura 3-13. Ciclos repetidos de carga-descarga en una batería de Ni-MH utilizando una razón de carga de 0,1C a 23 °C y una razón de descarga de 0,2C a 23 °C.

➤ Número de ciclos necesarios para el acondicionamiento.

El número de ciclos necesarios para lograr un buen acondicionamiento de la batería es aquel que permite que la batería alcance las características de funcionamiento especificadas por el fabricante, fundamentalmente su capacidad nominal. Teniendo en cuenta la experimentación previa realizada se ha podido constatar lo siguiente:

Baterías de Ni-Cd

- Se necesita un mínimo de 10 ciclos completos de carga-descarga para alcanzar el acondicionamiento óptimo de la batería. A medida que se realizan los ciclos de carga-descarga, la capacidad de la batería se va incrementando hasta alcanzar su valor nominal.

Baterías de Ni-MH

- Prácticamente no se necesitan ciclos de acondicionamiento. Las baterías de Ni-MH después de dos ciclos completos de carga-descarga alcanzan su capacidad nominal mostrando un comportamiento estable.

Si se realizan repetidos ciclos de carga-descarga cumpliendo con las condiciones descritas anteriormente, se garantiza que la batería alcanza su plena carga y que su puesta en servicio es óptima.

Una vez realizado el acondicionamiento de las baterías se procede a la realización de cada uno de los experimentos propuestos para estudiar su comportamiento en carga rápida.

3.5.2 Ensayos para el estudio de los procesos de carga

Para realizar un análisis exhaustivo del comportamiento de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH bajo carga rápida es conveniente realizar pruebas de carga desde razones de carga bajas hasta alcanzar razones de carga más altas. De esta forma se puede realizar un análisis más completo que muestre las variaciones que se producen en el comportamiento de la batería al aumentar la razón de carga y por tanto permite determinar la forma más adecuada de realizar la carga.

Los índices de comportamiento a tener en cuenta en el análisis comparativo de las características de las baterías cuando se utilizan diferentes razones de carga, son:

- Tiempo de carga.
- Evolución de la tensión de la batería.
- Capacidad suministrada a la batería.

- Capacidad descargada de la batería.
- Aceptación de carga.
- Eficiencia energética.
- Evolución de la temperatura de la batería.

Todos los índices de comportamiento se estudian a través de repetidos ciclos de carga-descarga utilizando las siguientes condiciones de funcionamiento:

1º. La carga de las baterías se realiza utilizando una razón de carga lenta para definir las características de partida de cada batería en estudio.

Antes de pasar al análisis del comportamiento de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH cuando se someten a carga rápida, es necesario definir las características de partida de las baterías en estudio cuando se les aplica una razón de carga lenta. De esta forma, se puede disponer de un comportamiento de referencia (para cada batería) que permita evaluar el comportamiento de la batería cuando se le incrementa la razón de carga aplicada.

- Condiciones en que se realiza la carga:

- La temperatura de la batería al inicio de cada carga es de 23 °C.
- Se aplica una razón de carga de 0,1C.
- La finalización de la carga se produce cuando se detecta hidrógeno por los sensores dispuestos con este fin.

- Condiciones en que se realiza la descarga:

- La temperatura de la batería al inicio de cada descarga es de 23°C.
- Se aplica una razón de descarga de 0,2C.
- La tensión de finalización de la descarga es 1 V/celda.

Las condiciones de funcionamiento seleccionadas para la descarga, se mantienen en todos los ensayos que tienen como finalidad comparar las características e índices de comportamiento de las baterías durante la carga.

- Tiempos de reposo:

Los tiempos de reposo entre los procesos de carga y descarga cumplen la misma función que en los ciclos de acondicionamiento: permiten que se restablezca la temperatura inicial de funcionamiento de la batería después que ésta ha variado debido a la realización previa de una carga o descarga.

2º. La carga de las baterías se realiza en iguales condiciones de funcionamiento que las utilizadas para definir las características de partida de cada batería, a excepción de la razón de carga que se incrementa gradualmente para observar su influencia en el comportamiento de las baterías.

Las condiciones en que se realiza la carga, la descarga y los tiempos de reposo tienen las mismas características que en los ensayos realizados con carga lenta, a excepción de que en este caso los ensayos se repiten para diferentes razones de carga.

Las razones de carga utilizadas para estudiar el comportamiento de la batería cuando se incrementa el régimen de carga por encima de carga lenta son 0,2C, 0,5C, 1,0C y 2,0C. Estas razones de carga permiten en teoría reducir el tiempo de carga desde aproximadamente 10 horas (carga lenta a 0,1C) hasta aproximadamente 30 minutos cuando se utiliza una razón de carga de 2,0C.

3º. Para los regímenes de carga que resulten interesantes (desde el punto de vista de la carga rápida), se procede a repetir los ensayos en las condiciones de funcionamiento mencionadas anteriormente utilizando diferentes temperaturas de trabajo.

En el capítulo 2 se realizó un estudio exhaustivo de la influencia de la temperatura en el comportamiento de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH. Las baterías mostraron variaciones en su comportamiento, en ocasiones significativas,

especialmente a temperaturas extremas de funcionamiento. Por este motivo, resulta interesante estudiar la influencia de la temperatura de trabajo en el comportamiento de las baterías cuando se aplican regímenes de carga elevados.

Las temperaturas escogidas para estudiar el comportamiento en carga de las baterías son 5°C, 15°C, 23°C y 33°C. Este margen de temperaturas se considera representativo de las condiciones en que normalmente se realiza la carga de las baterías.

Teniendo en cuenta que el interés de este trabajo se centra en el estudio de los procesos de carga rápida en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad y además, considerando la gran cantidad de ciclos de carga-descarga que se necesitan para la realización de cada tipo de ensayo (se alarga demasiado el periodo de experimentación), se escogen las razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C para realizar los ensayos a diferentes temperaturas con cada una de las baterías analizadas.

3.5.2.1 Selección del método de finalización de los procesos de carga en los ensayos realizados

Debido a la importancia que tiene el método utilizado para finalizar la carga (desde el punto de vista de la experimentación realizada) se presentan a continuación los pasos que se siguieron para su selección:

Inicialmente, se tenía conocimiento acerca de la producción de gases cuando la batería alcanza la zona de plena carga y se inicia la sobrecarga. El objetivo era encontrar una relación bien definida entre parámetros como la presión interna de la batería y otros más fácilmente medibles como la tensión y la temperatura.

Por tanto, los primeros intentos se encaminaron hacia la medida de la presión interna de la batería empleando para ello un sensor de presión y un aditamento especialmente diseñado para su acople a la estructura de la batería. El problema era que esta variante resultaba demasiado compleja y costosa. Además requería de una intervención directa sobre la estructura de la batería y una modificación de sus características originales. No obstante, este primer intento de buscar una relación

entre la presión (producción de gas en el interior de la batería) y otros parámetros externos (tensión y temperatura) aportó los primeros resultados: solo se produce un aumento importante de la producción de gas y por tanto, de la presión interna de la batería en la parte final del proceso de carga, cuando la batería se encuentra cerca de su estado de plena carga. El causante principal de este incremento de la presión es el hidrógeno generado por las reacciones electroquímicas que tienen lugar en el electrodo negativo de cada celda de la batería. En ambas tecnologías de baterías (Ni-Cd y Ni-MH) el electrodo negativo se diseña con determinada cantidad adicional de material activo, de manera que se alcance la sobrecarga más tarde que en el electrodo positivo.

Por tanto, de estas primeras experiencias se sacaron las siguientes conclusiones:

- a) En cada ensayo de carga que se realice y en cada una de las baterías analizadas, se necesita finalizar la carga en un punto común que permita realizar un análisis comparativo de los procesos de carga, tanto para diferentes razones de carga y diferentes temperaturas de trabajo como para diferentes baterías estudiadas.
- b) Teniendo en cuenta los inconvenientes de la utilización de un sensor de presión debido fundamentalmente a que se necesita modificar la estructura de la batería y además, debido a que su empleo se reduce únicamente a una celda en particular, se decidió prescindir de la medida de presión.
- c) Para finalizar la carga se selecciona un sensor de gas con una alta sensibilidad al hidrógeno que sea capaz de detectar la presencia de este gas una vez que es expulsado por la batería.

En la figura 3-14 se puede observar la evolución de la tensión de celda y de la señal de tensión obtenida del sensor de hidrógeno durante la carga de una batería de Ni-Cd.

En las primeras pruebas realizadas utilizando el sensor de hidrógeno se comprobó que cuando la batería alcanza la plena carga el sensor detecta la presencia del hidrógeno expulsado por la batería. Es importante destacar que en condiciones

normales de funcionamiento este proceso ocurre de forma natural y es por ello que siempre en las especificaciones y recomendaciones de los fabricantes se precisa que las baterías deben ubicarse en un lugar ventilado donde los gases producidos durante la carga se puedan evacuar con facilidad [87].

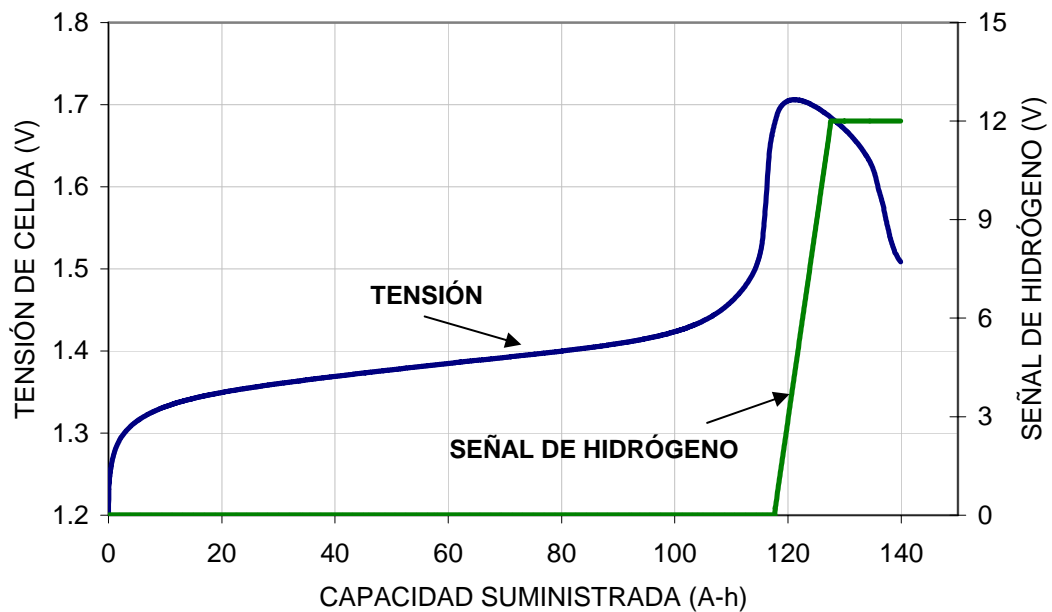


Figura 3-14. Evolución de la tensión de celda y de la señal de tensión procedente de un sensor de hidrógeno durante la carga de una batería de Ni-Cd.

La figura 3-15 muestra una de las cargas realizadas durante los ciclos de acondicionamiento de una batería de Ni-Cd (razón de carga de 0,1C con un 40 por ciento de sobrecarga sobre la capacidad nominal especificada por el fabricante -100 Ah- y temperatura de 23°C). En la figura 3-15 se puede observar como después de detectarse la presencia de hidrógeno debido a la sobrecarga de la batería se produce un incremento significativo de la pendiente de la temperatura. Esto se debe a que durante la sobrecarga, el proceso de carga se vuelve muy ineficiente y una gran parte de la corriente se invierte en reacciones secundarias que causan la generación de gas y el aumento de la temperatura.

La pérdida de gas del interior de la batería tiene una relación directa con la pérdida de agua del electrolito y por tanto, con un aumento de la necesidad de

mantenimiento de la batería. Además, el aumento excesivo de la temperatura puede provoca una degradación de los componentes de la batería acortando sensiblemente su vida cíclica. Estos fenómenos indeseados son aún más perjudiciales cuando la razón de carga aplicada a la batería es alta. Tanto la producción de gas como el aumento de la temperatura se incrementan con la razón de carga aplicada a la batería, fundamentalmente cuando se aplica carga rápida con el objetivo de reducir el tiempo de carga [15][20].

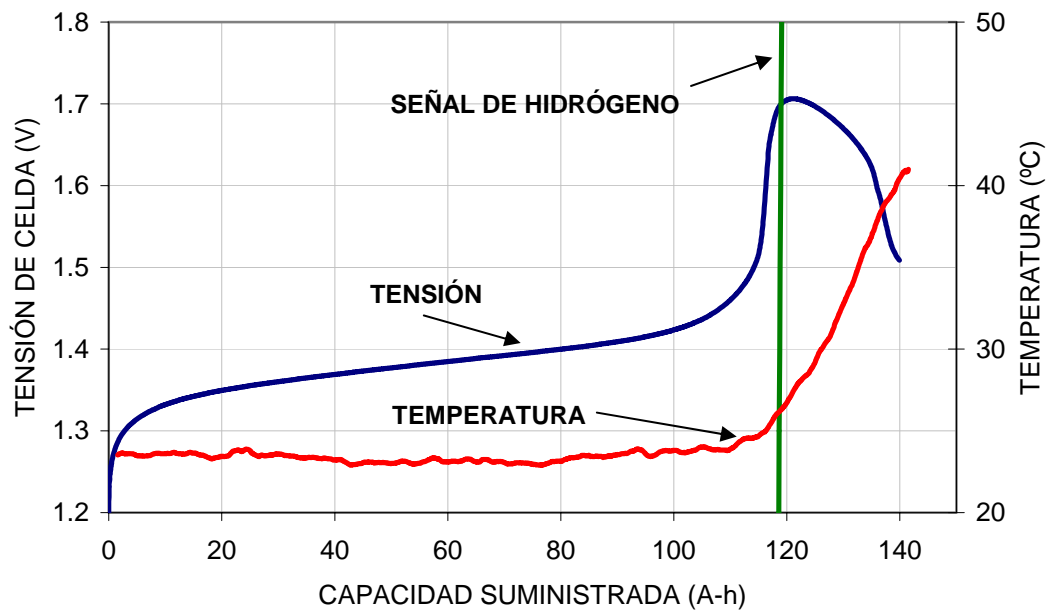


Figura 3-15. Carga de acondicionamiento de una batería de Ni-Cd. Razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

Sin embargo, si la carga se detiene en el momento en que se detecta hidrógeno se evita el incremento fuerte de la temperatura y la expulsión de grandes cantidades de este gas. De esta manera, se logra una mejor conservación de las características de la batería evitando el envejecimiento prematuro de la misma. Como ejemplo, la figura 3-16 muestra la evolución de la tensión y de la temperatura de la batería durante una carga de 0,1C a 23 °C, cuando la carga se corta en el instante en que se detecta la presencia de hidrógeno. Como se puede apreciar, en estas condiciones la temperatura no se incrementa prácticamente. Además, la pérdida de gas es

insignificante ya que el proceso de carga se detiene inmediatamente después de la detección de la producción de hidrógeno.

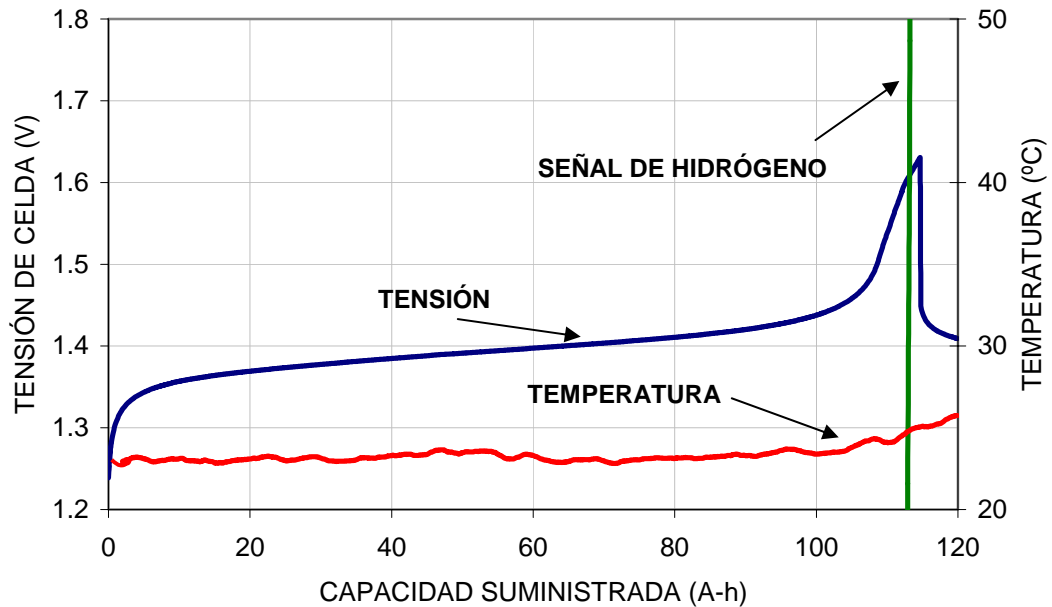


Figura 3-16. Finalización de la carga de una batería de Ni-Cd después de detectar la presencia del hidrógeno producido en sobrecarga. Razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

A las baterías de Ni-MH se les aplicó la misma filosofía de trabajo durante los ciclos de acondicionamiento, solo que el tanto por ciento de sobrecarga permitido en este caso fue menor que el aplicado a las baterías de Ni-Cd (aproximadamente de un 10 por ciento sobre la capacidad nominal especificada por el fabricante -108 Ah-).

Durante los primeros ciclos de acondicionamiento de las baterías de Ni-MH se observó que aún cuando la razón de carga utilizada era baja (0,1C), se producía la expulsión de hidrógeno inmediatamente después de que la batería alcanzaba el 100 por ciento de su capacidad nominal. Aunque las baterías de Ni-MH se comportan como selladas durante la mayor parte del proceso de carga permitiendo la recombinación de gas en su interior, cuando se sobrecargan se produce la apertura de las válvulas de seguridad y la expulsión de hidrógeno al exterior (ver apartado 3.2 de este capítulo). Este fenómeno permite utilizar la medida de hidrógeno para

detectar cuando el proceso de carga se vuelve ineficiente, al igual que en las baterías de Ni-Cd.

En la figura 3-17 se representan las curvas de tensión de celda y de temperatura en una batería de Ni-MH durante una carga de 0,1C a 23 °C. Como se puede observar, la señal procedente del sensor de hidrógeno marca el instante en que este gas emana desde el interior de la batería a causa de la sobrecarga. En la zona final de la carga se puede observar el cambio que se produce en la pendiente de la temperatura de la batería.

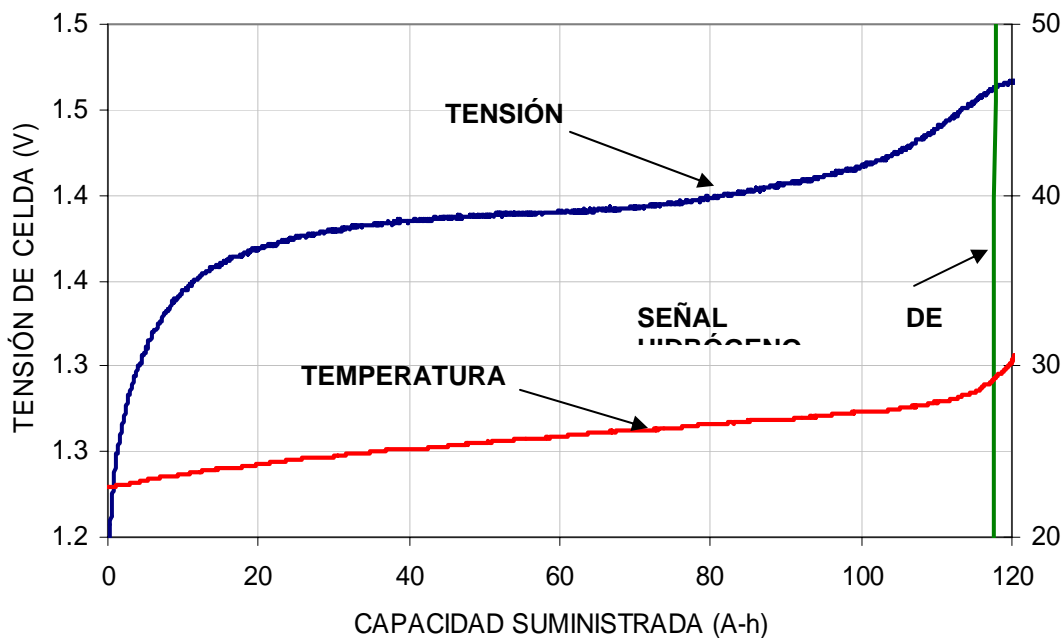


Figura 3-17. Carga de acondicionamiento de una batería de Ni-MH. Razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

Por tanto, se concluye para baterías de Ni-Cd y para las baterías de Ni-MH que:

- La aplicación de regímenes de carga elevados no tiene sentido después de que la batería alcanza el estado de sobrecarga debido a la ineficiencia del proceso y al peligro de deterioro de la batería.
- La sobrecarga de la batería se evita cortando la carga cuando se detecta la producción de hidrógeno.

- c) El estudio del comportamiento de la batería cuando se somete a razones de carga altas (carga rápida) se debe realizar solo hasta que se alcanza la zona de sobrecarga (detección de hidrógeno). De esta forma se asegura el mantenimiento de la batería en condiciones óptimas de funcionamiento.

3.5.3 Otras condiciones de funcionamiento de interés

- Ensayos de sobrecarga.

El principal objetivo de este tipo de ensayos es estudiar los efectos de la sobrecarga en las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH y determinar el instante a partir del cuál ésta tiene lugar.

La carga se realiza siguiendo las indicaciones adoptadas para los ensayos de carga con la diferencia de que el final de la carga se establece en función del porcentaje de sobrecarga que se quiere analizar y no por la detección de hidrógeno. La descarga se realiza en las mismas condiciones que las descritas para el resto de pruebas realizadas.

- Ensayos de carga rápida partiendo de una batería descargada parcialmente.

El estudio de los procesos de carga en las baterías (a diferentes razones de carga y a diferentes condiciones de temperatura), se realizó partiendo de baterías totalmente descargadas.

Sin embargo, para determinadas razones de carga especialmente interesantes se estudió el comportamiento de las baterías partiendo de una descarga parcial, siendo ésta la única condición diferente de estos ensayos.

- Ensayos de descargas parciales.

Uno de los fenómenos asociados con las baterías es el conocido como “efecto memoria”. Teniendo en cuenta que las baterías estudiadas se han sometido a repetidos ciclos de carga-descarga en condiciones de laboratorio (condiciones controladas y repetibles) y que por tanto los resultados obtenidos se pueden ver afectados por este fenómeno, es importante su estudio.

Con cada batería, se realizaron aproximadamente 60 ciclos de carga-descarga parcial (carga a 0,2C y finalización por detección de hidrógeno y descarga a 0,2C de solo el 20 por ciento de la capacidad nominal de la batería). Los resultados obtenidos de este tipo de ensayos se detallan en el capítulo 2.

- Ensayos de descarga profunda.

Estos ensayos tienen como objetivo, determinar la tensión de finalización de la descarga más adecuada tanto en las baterías de Ni-Cd como en las de Ni-MH.

Las tensiones de finalización estudiadas fueron 0,9 V/celda, 1 V/celda y 1,1 V/celda. Los resultados obtenidos de este tipo de ensayos se detallan en el capítulo 2.

3.6 MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE RESULTADOS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS

El análisis del comportamiento de un tipo de batería en particular no se puede evaluar a partir del estudio de unos pocos ciclos de carga-descarga. Se necesita un número elevado de ensayos para describir el comportamiento de un tipo de batería o de una tecnología de batería en unas condiciones de funcionamiento específicas. Generalizar el comportamiento de las baterías resulta complejo ya que:

- El comportamiento de las baterías puede cambiar sensiblemente aún siendo de una misma tecnología de batería (composición del material activo, concentración del electrolito, tipo de separador utilizado, estructura de las placas, etc.).
- Existe una dispersión de las características de las baterías dentro de una misma serie de fabricación.
- El comportamiento de las baterías cambia a medida que envejecen.

- Las condiciones de trabajo tienen una marcada influencia sobre el comportamiento de las baterías.

Las razones expuestas anteriormente avalan las dificultades que existen para encontrar modelos matemáticos que simulen el comportamiento de una determinada tecnología de batería, más aún cuando éstas funcionan en condiciones muy diferentes.

Por este motivo, aunque en ocasiones se puede prever el comportamiento de un determinado tipo de batería en unas condiciones específicas de funcionamiento (a través de conocimientos teóricos de que se pueda disponer) es fundamental disponer de datos reales obtenidos mediante la experimentación que puedan validar cualquier teoría que se desarrolle. A medida que se repiten los ensayos en diferentes baterías se pueden extraer conclusiones más acertadas.

Para demostrar un comportamiento típico en unas condiciones determinadas, es necesario realizar repetidos ciclos de carga-descarga con un control total de las variables que intervienen en el proceso a fin de asegurar la fiabilidad de los resultados observados. Por ejemplo, hay que tener en cuenta que las baterías necesitan varios ciclos para estabilizar su comportamiento cuando se les aplica un régimen de carga diferente al que estaban siendo sometidas. Como se demostró en el capítulo 2 este fenómeno es más notable en la tecnología de Ni-Cd que en la de Ni-MH. De esta forma, las baterías de Ni-Cd necesitan varios ciclos de carga-descarga para estabilizar su comportamiento una vez que se cambian las condiciones de trabajo cíclico (fundamentalmente la razón de carga y la temperatura de funcionamiento).

En la figura 3-18 se puede observar cómo se estabiliza el comportamiento de una batería de Ni-Cd cuando se somete de forma repetitiva a una carga de 0,1C (después de la descarga total) y finalizando cuando se detecta la presencia de hidrógeno después de haber sido sometida a determinados ciclos de trabajo en unas condiciones específicas. En este caso, la carga aplicada a la batería durante los ciclos anteriores a los mostrados en la figura 3-18 se realizaron a razón de 0,1C y la

finalización de la carga se realizó después de una sobrecarga del 30 por ciento respecto a la capacidad nominal de la batería.

Como resultado de los ciclos previos la batería acepta inicialmente una capacidad mayor antes de entrar en sobrecarga. De este modo, el primer ensayo de carga tuvo una duración superior a 650 minutos, muy por encima del comportamiento promedio observado una vez que se alcanzó el régimen de trabajo estable. A medida que se repiten los ciclos de carga-descarga se va reduciendo la capacidad que la batería es capaz de aceptar y el comportamiento se va estabilizando entorno a determinado punto (en este caso entre 605 y 610 minutos de carga).

Por tanto, de igual manera que se necesitan ciclos de acondicionamiento para la puesta en servicio de una batería nueva, también se necesitan siempre que se comience un nuevo tipo de ensayo de carga-descarga en unas condiciones específicas de funcionamiento. De esta forma, cualquier ensayo se realiza partiendo de una batería en las mismas condiciones.

La necesidad de repetir cada tipo de ensayo con cada batería durante un número determinado de ciclos de carga-descarga alarga considerablemente el tiempo de experimentación. No obstante, es la única forma de que los ensayos nos aporten un conocimiento real sobre el comportamiento de la batería ante distintos regímenes, ya sea de carga o de descarga y diferentes temperaturas.

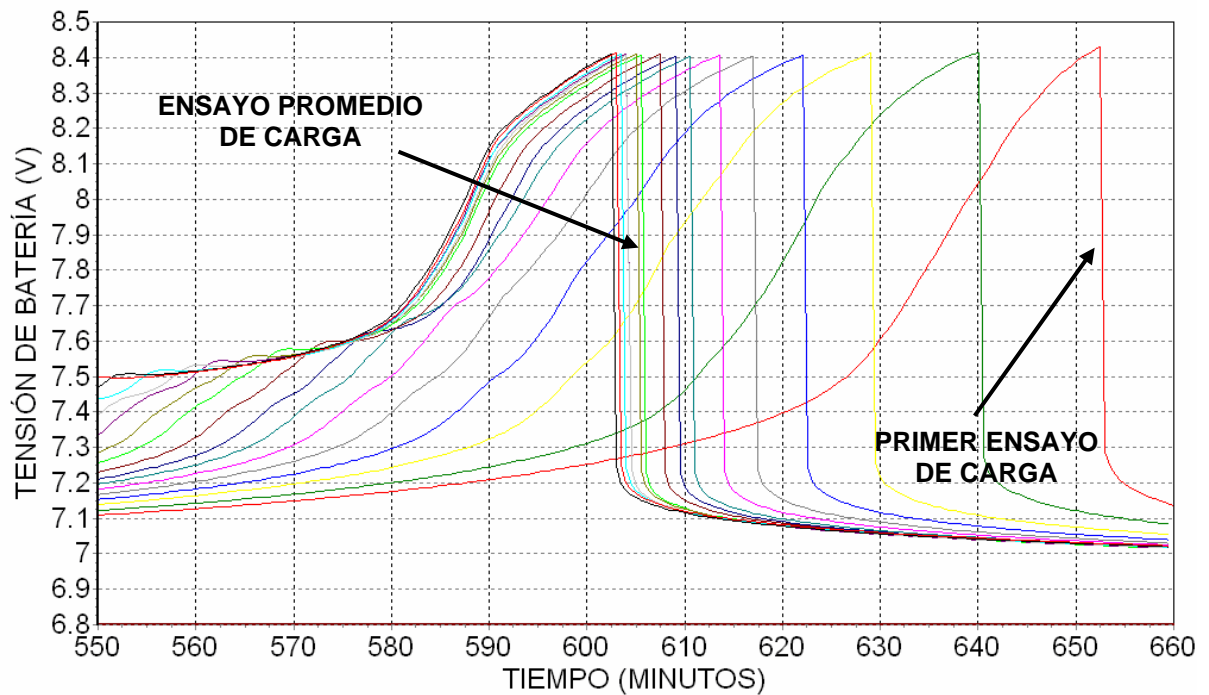


Figura 3-18. Evolución de la tensión en una batería de Ni-Cd durante la parte final de la carga. Representación de varios ciclos de carga a 0,1C y finalización de la carga por detección de hidrógeno.

Para evitar resultados erróneos (resultados que no son representativos del comportamiento típico de una batería cuando se somete a determinadas condiciones de funcionamiento) en este trabajo se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Antes de comenzar cualquier tipo de ensayo se realizan varios ciclos de acondicionamiento con el objetivo de igualar las características de partida de la batería.

En el caso de las baterías de Ni-Cd se realiza un mínimo de 5 ciclos de acondicionamiento y en el caso de las baterías de Ni-MH se realiza un mínimo de 2 ciclos de acondicionamiento.

- Cualquier comportamiento típico (en unas condiciones de funcionamiento específicas) de cualquiera de las baterías estudiadas en este trabajo se

corresponde con un comportamiento promedio obtenido después de realizar suficientes ciclos de carga-descarga.

En la tecnología de Ni-Cd se ha realizado un mínimo de 15 ensayos (carga-descarga) antes de considerar válido cualquier resultado obtenido de la experimentación.

En el caso de las baterías de Ni-MH se observaron menores variaciones del comportamiento de la batería durante la realización de los ensayos (ciclos de carga-descarga en una misma batería). Por este motivo, cada uno de los ensayos realizados en unas determinadas condiciones de funcionamiento, consta de un mínimo de 10 ciclos de carga-descarga.

- Se selecciona un ensayo representativo del comportamiento promedio observado en cada una de las baterías estudiadas.
- Hay que destacar que en cada batería estudiada, la variación máxima en el comportamiento de la batería durante los repetidos ciclos de carga-descarga de cada ensayo específico, no superó el 3 por ciento.
- Los resultados mostrados en este trabajo se corresponden con un comportamiento promedio observado en el grupo de baterías escogidas para realizar los ensayos.
- Hay que resaltar que las diferencias observadas en el comportamiento promedio de las baterías cuando se sometieron a iguales condiciones de funcionamiento no superaron el 5 por ciento, excepto cuando la razón de carga aplicada fue de 2,0C en que las diferencias se incrementaron hasta un máximo del 10 por ciento.
- En todos los casos, las variaciones observadas en el comportamiento de las baterías de Ni-MH fueron menores que las observadas en las baterías de Ni-Cd. Después de estudiar el comportamiento de las baterías de Ni-MH durante los procesos de descarga (capítulo 2), este resultado era esperado.

Teniendo en cuenta las estrictas condiciones de funcionamiento impuestas para la realización de los ensayos, el número elevado de ciclos de carga-descarga en cada batería por cada tipo de ensayo y la precisión con que se analizaron los resultados obtenidos, los estudios realizados se consideran altamente fiables.

El ensayo de diferentes baterías durante repetidos ciclos de carga-descarga en distintas condiciones de funcionamiento genera una gran cantidad de información que es almacenada en un ordenador personal para su posterior análisis. Por este motivo, es sumamente importante disponer de herramientas de software específicas que faciliten la representación y el análisis de los ficheros de datos generados durante la experimentación. No obstante, el tratamiento de la información contenida en los ficheros obtenidos de los bancos de ensayos se puede realizar con cualquier programa de uso comercial.

3.6.1 Software de análisis de los datos obtenidos de los ensayos

El programa “Gestión y tratamiento de datos en ensayos automatizados”, que se ha desarrollado específicamente para la realización del presente trabajo brinda una gran flexibilidad en el tratamiento y la representación gráfica de los datos recogidos por los bancos de ensayos [117].

Las ventajas más importantes del programa se pueden resumir de la siguiente manera:

- Gran capacidad para la representación gráfica de variables. Posibilita la representación de una misma variable de un número elevado de ficheros de datos. De esta forma se facilitan las comparaciones del comportamiento de cualquier variable en innumerables ficheros generados en el banco de ensayos.
- Gran flexibilidad para adaptar las magnitudes de las variables en pantalla con el fin de observar transitorios importantes (fundamentalmente los que se producen en la zona próxima a plena carga).

- Realización de análisis estadísticos de las diferentes variables que registran los bancos de ensayos.

De esta manera se puede disponer de una serie de datos de los ensayos como son: valores máximos y mínimos de cualquier variable analizada, magnitud de la capacidad cargada y/o descargada de la batería, tiempo de ejecución de la carga y/o descarga de cada uno de los ensayos, entre otros.

- Generación de informes sobre la evolución de las variables visualizadas en pantalla.
- Facilidad para transportar gráficos a ficheros de textos.

La figura 3-19 muestra una representación de la tensión durante la carga de varios ensayos de similares características.

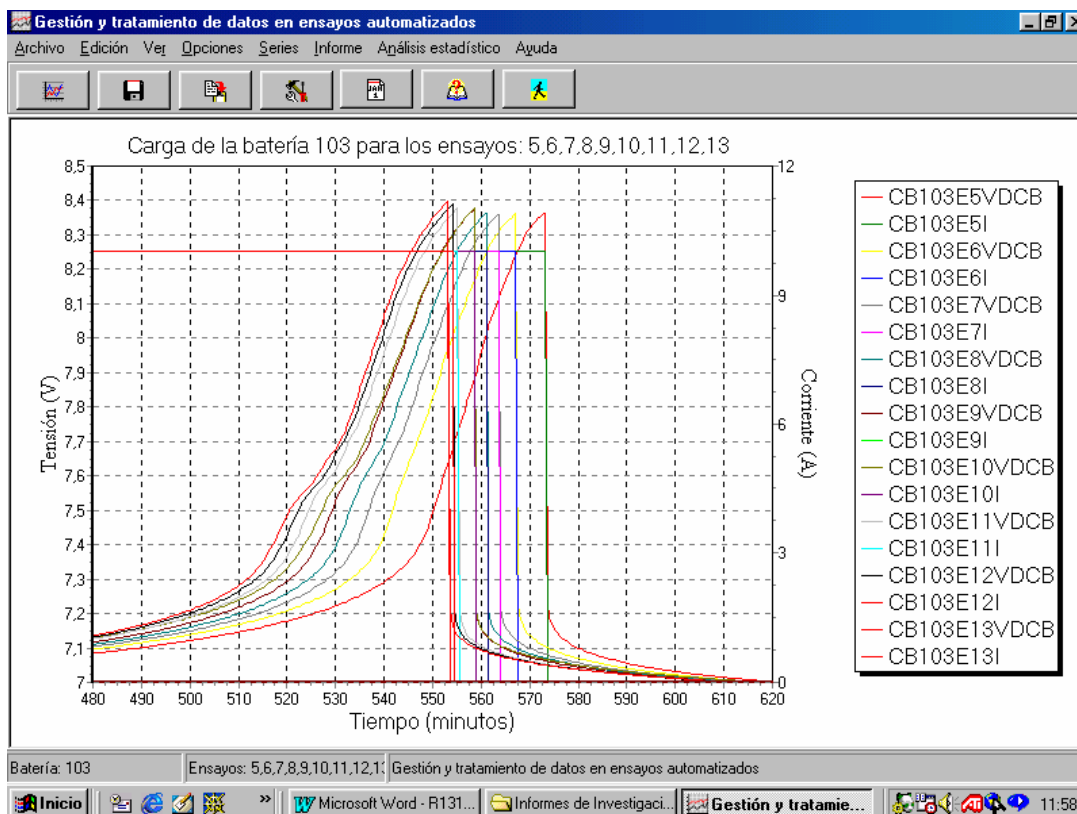


Figura 3-19. Evolución de la tensión en la zona final de carga en varios ensayos realizados con la misma batería y bajo las mismas condiciones de funcionamiento.

A través de los análisis que facilita el programa de tratamiento de datos se puede determinar el comportamiento promedio de la batería durante repetidos ciclos de carga-descarga.

CAPÍTULO

4

**CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE
CARGA DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS
DE Ni-Cd Y DE Ni-MH**

4 CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE CARGA DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH

4.1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento completo del comportamiento de la batería durante la carga, es un factor determinante a la hora de escoger un método apropiado de carga. Cuando se necesita aplicar carga rápida para reducir drásticamente los tiempos de carga y además, hacer un aprovechamiento óptimo de las baterías disponibles, es muy importante conocer la forma en que las baterías responderán a los requerimientos de carga exigidos.

Las condiciones en que se realiza la carga de una batería determinan en gran medida, la disponibilidad de la energía almacenada en el menor tiempo posible, la capacidad real que éstas pueden aportar durante su descarga, así como el tiempo que éstas pueden funcionar adecuadamente sin sufrir daños físicos que acorten su vida cíclica en una aplicación específica [45].

Las principales variables que influyen en el comportamiento de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH durante la carga son la razón de carga o magnitud de la corriente de carga y la temperatura del medio donde se encuentre funcionando la batería. La razón de carga se expresa generalmente como múltiplo o fracción de la capacidad nominal de la batería. Por ejemplo, una razón de carga de 0,1C en baterías de 100 A-h de capacidad nominal equivale a una corriente de carga de 10 A y una razón de carga de 2,0C es equivalente a una corriente de carga de 200 A.

En este capítulo se realizará un estudio detallado del comportamiento de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH bajo diferentes condiciones de carga, partiendo desde razones de carga bajas (carga lenta) y a temperatura ambiente de 23 °C hasta llegar a aplicar razones de carga elevadas (carga rápida) y bajo diferentes condiciones de temperatura ambiente.

Antes de comenzar el análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio, se definirán los principales índices que permiten evaluar el comportamiento en carga de las tecnologías de baterías en estudio.

4.1.1 Índices empleados en el análisis del comportamiento de las baterías durante los procesos de carga

4.1.1.1 La aceptación de carga

Durante el proceso de carga en baterías de Ni-Cd y Ni-MH, no toda la energía suministrada por el equipo de carga se convierte en energía almacenada, disponible durante la siguiente descarga. Parte de la energía suministrada se pierde debido a reacciones parásitas que producen calor y generan de gases.

La *aceptación de carga* es un término que caracteriza la eficiencia de la carga y no es más que la relación entre la capacidad descargada y la capacidad suministrada a la batería durante un ciclo completo de carga-descarga y en unas condiciones específicas (ambas expresadas en amperios-hora). De la ecuación 4-1 se puede obtener de forma sencilla la aceptación de carga en una batería cualquiera:

$$\eta_c = \left[\frac{\int I_d \cdot dt}{\int I_c \cdot dt} \right] \cdot 100 \quad (4-1)$$

Las variables de la ecuación 4-1 se definen de la siguiente manera:

I_d Corriente durante la descarga de la batería (A)

I_c Corriente durante la carga de la batería (A)

El proceso de carga en baterías de Ni-Cd y Ni-MH pasa por una serie de zonas de diferentes niveles de eficiencia como se puede observar en la figura 4-1. Cada una de estas zonas está relacionada con distintos procesos electroquímicos. Inicialmente (zona 1), hay un porcentaje de la carga suministrada que se emplea en transformar una parte del material activo que posteriormente no se utiliza durante la descarga.

Esto se hace más evidente cuando se utilizan razones de carga altas y particularmente durante los primeros ciclos de carga-descarga. En esta zona la eficiencia de la carga comienza a aumentar rápidamente hasta alcanzar su valor máximo. La figura 4-1 muestra la evolución que sigue la eficiencia del proceso de carga en baterías de Ni-Cd y Ni-MH a temperatura ambiente de 23 °C y utilizando una razón de carga baja, de 0,1C.

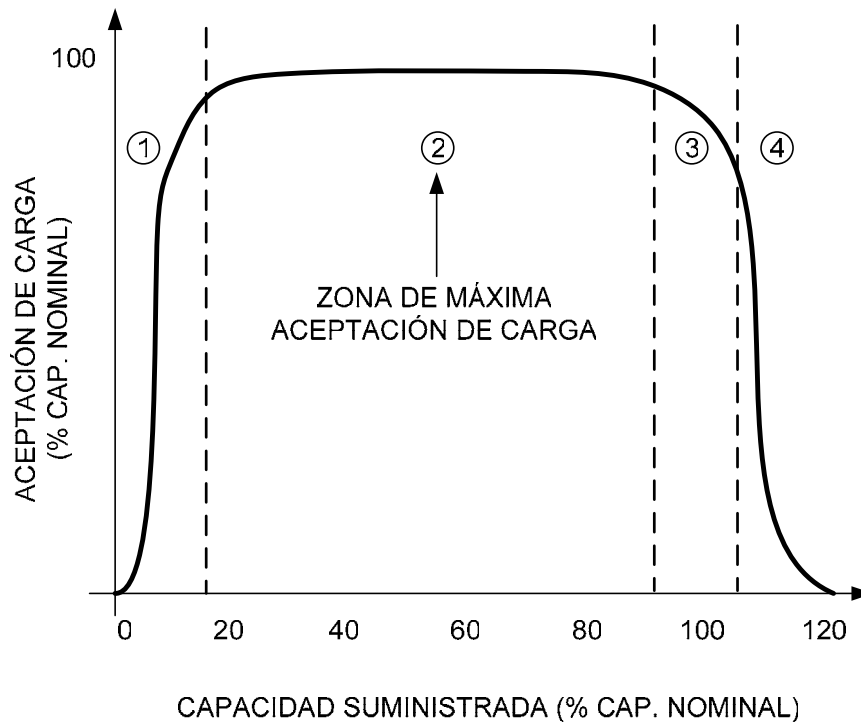


Figura 4-1. Evolución de la eficiencia del proceso de carga en baterías de Ni-Cd y Ni-MH utilizando una razón de carga de 0,1C y a temperatura ambiente de 23 °C.

La zona 2 mostrada en la figura 4-1 es una zona de gran eficiencia, donde prácticamente toda la energía suministrada por el sistema de carga se transforma en energía disponible durante la descarga, llegando a valores de eficiencia próximos al 100 por ciento. Esta zona de alta eficiencia durante la carga representa un porcentaje bastante grande del tiempo en que transcurre el proceso de carga y es una zona donde se pueden utilizar razones de carga altas con el fin de acortar los tiempos de recarga. Cuando las razones de carga utilizadas son elevadas, la alta eficiencia de esta zona decrece. No obstante, los valores de eficiencia siguen siendo bastante altos, siempre y cuando la batería no se someta a sobrecargas excesivas.

En este sentido debe tenerse en cuenta un compromiso entre la necesidad de realizar la carga en el menor tiempo posible y la obtención de una aceptación de carga adecuada, que permita aprovechar la mayor cantidad de energía posible durante la descarga de la batería. Este compromiso se analiza en las secciones posteriores sobre la base de los experimentos realizados en el laboratorio.

La zona 3 mostrada en la figura 4-1 es una zona de transición cercana a la plena carga de la batería. En esta zona cada vez existe menor cantidad de material activo que convertir en los electrodos de la batería y la corriente de carga comienza a favorecer la producción de gas y el aumento de la temperatura. Esta zona es de suma importancia a la hora de evaluar la evolución de las variables que permitirán tomar decisiones en cuanto a la finalización del proceso de carga o el paso a una razón de carga muy inferior que impida aumentos incontrolados de la producción de gas y de la temperatura. La mayoría de los criterios de detección de fin de carga y fundamentalmente, los criterios de finalización de la carga rápida se basan en el seguimiento de la evolución de diferentes variables en esta zona de la curva de eficiencia, durante el proceso de carga.

La zona 4 mostrada en la figura 4-1 es una región de sobrecarga, donde prácticamente toda la corriente de carga conduce a la generación de gas y a aumentos de la temperatura. El comportamiento en carga de la batería en esta zona es completamente ineficiente y no se justifica en ningún caso la aplicación de razones de carga altas. Por tal motivo, queda descartada la aplicación de carga rápida en la región de sobrecarga.

El comportamiento de la batería en cada una de las zonas descritas, y específicamente la aceptación de carga, depende de la temperatura y de la razón de carga aplicada a la batería durante su funcionamiento.

En las secciones siguientes se evalúa la aceptación de carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH bajo diferentes razones de carga y en diferentes condiciones de temperatura, para estudiar la capacidad de estas baterías de asimilar carga rápida y definir los algoritmos de carga más adecuados en cada caso.

4.1.1.2 La eficiencia energética durante la carga

Otro índice importante que permite evaluar el comportamiento de la batería durante el proceso de carga, es la eficiencia energética. Este índice es especialmente importante cuando se utilizan razones de carga elevadas para recargar la batería.

La eficiencia energética del proceso de carga es la relación entre la energía que es posible extraer de una batería durante su descarga respecto a la energía que se suministra durante su carga. Utilizando la ecuación 4-2 se puede determinar de forma simple la eficiencia energética de un proceso de carga-descarga:

$$\eta_e = \left[\frac{\int (V_d \times I_d) dt}{\int (V_c \times I_c) dt} \right] \cdot 100 \quad (4-2)$$

Las variables de la ecuación 4-2 se definen de la siguiente manera:

V_d Tensión de la batería durante la descarga (V)

V_c Tensión de la batería durante la carga (V)

I_d Corriente de descarga de la batería (A)

I_c Corriente de carga de la batería (A)

Cuando se precisa de la aplicación de carga rápida para reducir el tiempo de recarga de la batería, se necesitan grandes magnitudes de corrientes y en ocasiones es importante analizar la eficiencia energética del proceso para evaluar las pérdidas de energía y los consiguientes costes de funcionamiento del sistema en su conjunto (cargador – baterías).

No toda la energía suministrada a la batería durante la carga se puede aprovechar durante la descarga que le sigue. La eficiencia energética decrece de forma notable con el aumento de la razón de carga utilizada para recargar a la batería. Durante una

carga rápida los valores de la tensión y la corriente que deben suministrar los equipos de carga son mayores que los valores típicos durante una carga lenta. Una parte de la energía suministrada a la batería se utiliza para suplir las pérdidas producidas por reacciones secundarias asociadas con los procesos de carga y que producen calor y gases.

Con respecto a la descarga, los valores de tensión y corriente que se obtienen de la batería siempre son menores que los necesitados para cargarla. A razones de carga y de descarga bajas existe una aproximación entre los valores de tensión y corriente suministrados tanto en carga como en descarga y la eficiencia energética es la mayor posible (en condiciones óptimas de funcionamiento se puede alcanzar aproximadamente entre un 85 y un 90 por ciento de eficiencia energética). Las pérdidas de energía están asociadas con los procesos electroquímicos que permiten la conversión del material activo durante la carga-descarga de la batería y con otras reacciones químicas derivadas del propio proceso de carga-descarga y que provocan aumentos de la temperatura y producción de gases. Otras pérdidas también están asociadas con la resistencia interna de la batería al paso de la corriente eléctrica.

La eficiencia energética es otro índice que permite evaluar el comportamiento de la batería ante procesos de carga rápida y será estudiado en las secciones posteriores para diferentes razones de carga y en diferentes condiciones de temperatura ambiental.

4.1.2 Condiciones de carga que afectan la capacidad real que puede suministrar una batería durante su descarga

Tanto la temperatura durante la carga como la cantidad de carga y la manera en que ésta es suministrada a la batería, tienen un marcado impacto sobre la capacidad que la batería es capaz de entregar durante su descarga. Como ya se ha mencionado en secciones anteriores la razón de carga utilizada y la temperatura de funcionamiento hacen variar los índices de comportamiento de la batería y determinan su capacidad para aceptar carga rápida en unas condiciones óptimas.

El objetivo fundamental que persigue la carga rápida, es el de suministrar a la batería el mayor porcentaje de su capacidad nominal en el menor tiempo posible, de forma que en cualquier instante esa capacidad cargada pueda estar disponible. Por tanto, es necesario considerar el compromiso existente entre la brevedad requerida para realizar la carga y la cantidad de carga que se puede suministrar de forma eficiente y sin sobrecarga.

La capacidad que realmente se puede descargar de una batería en una aplicación específica, se ve afectada por las condiciones en que se realice la carga. Las principales variables, que influyen sobre la capacidad real que se puede descargar de la batería son, la temperatura y la razón de carga utilizada.

4.1.2.1 La temperatura durante el proceso de carga

La eficiencia de la carga de las baterías puede variar significativamente cuando se producen cambios en la temperatura de funcionamiento. A medida que se eleva la temperatura de la batería sobre la temperatura ambiente (23 °C), se reduce tanto la aceptación de carga como la capacidad real de la misma, fundamentalmente cuando se aplican razones de carga elevadas. Una batería funcionando a temperaturas elevadas no aceptará más carga que la que pudiera aceptar a temperatura ambiente, aún cuando la carga suministrada supere varias veces la capacidad nominal de la batería.

Cuando la temperatura de funcionamiento de la batería es baja, se dificultan los procesos electroquímicos relacionados con la transferencia iónica, producto del aumento de la densidad del electrolito. Al disminuir la temperatura aumenta la resistencia interna de la batería. Para temperaturas bajas la eficiencia del proceso de carga disminuye y la capacidad que es posible suministrar a la batería antes de alcanzar la zona ineficiente del proceso de carga es menor por lo que la capacidad real disponible durante la descarga de la batería es menor.

A pesar de la disminución que se produce en la capacidad real disponible cuando la carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH se realiza a bajas temperaturas, es

importante destacar que su comportamiento es muy superior a las baterías de plomo-ácido funcionando en similares condiciones de temperatura.

Por otro lado, cuando la batería se encuentra funcionando a temperaturas bajas, un incremento de la razón de carga puede suponer un aumento de la temperatura de funcionamiento y por tanto se puede producir una mejoraría en su comportamiento. De cualquier manera, el incremento de la razón de carga funcionando a temperaturas bajas puede tener inconvenientes, sobre todo cuando las razones de carga son altas.

Las ventajas o inconvenientes de la aplicación de carga rápida cuando la batería funciona en ambientes de temperaturas bajas o altas es uno de los puntos importantes que será objeto de estudio en este capítulo.

4.1.2.2 La razón de carga aplicada

El efecto de la razón de carga sobre la capacidad real que puede ser descargada de la batería, cuando se aplican razones de carga bajas (carga lenta), es relativamente despreciable siempre y cuando las razones de carga y las sobrecargas aplicadas estén dentro de las especificaciones de funcionamiento de la batería. Las razones de carga inferiores a las previstas en las especificaciones de funcionamiento de la batería, pueden disminuir la capacidad real de la batería, si ésta se mantiene en sobrecarga durante un prolongado periodo de tiempo.

El aumento de la razón de carga aplicada a la batería (por encima de 0,1C) puede mejorar la aceptación de carga y por tanto la capacidad real que es posible extraer de la batería durante su descarga. No obstante existen márgenes de funcionamiento en los que es necesario tener en cuenta un compromiso entre la rapidez de la carga y la capacidad real que puede ser descargada de la batería, fundamentalmente cuando las razones de carga son muy elevadas (1,0C o superiores).

El análisis de la capacidad real que puede ser descargada de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH cuando son cargadas a diferentes razones de carga, desde carga lenta hasta razones de carga elevadas (carga rápida) será analizado en las secciones posteriores sobre la base de las pruebas de carga realizadas en el laboratorio.

4.1.2.3 El tiempo de carga

El tiempo de duración de la carga debe ser escogido en función de la razón de carga empleada, considerando incluso los tiempos adicionales de carga para suplir las pérdidas producto de la falta de eficiencia al final del proceso de carga. En general, el tiempo de carga mínimo adecuado cuando se utiliza una razón de carga baja (0,1C o menos), es el que garantiza el retorno del 140 - 160 por ciento de la capacidad nominal de la batería. Evidentemente, los porcentajes de carga mencionados no pueden ser suministrados a la batería cuando éstas se someten a un proceso de carga rápida. Es decir, está totalmente desaconsejada la aplicación de carga adicional después de alcanzar la zona de carga ineficiente utilizando razones de carga altas. En estos caso se aconseja, si es necesario, una corriente de mantenimiento que proporcione gradualmente un porcentaje de carga bajo, hasta alcanzar la condición de plena carga.

De cualquier forma el tiempo de carga queda determinado por la capacidad que tenga la batería de asimilar unas condiciones de carga específicas y por la forma en que evolucionen las variables que determinan el instante de finalización de la carga. Fundamentalmente, en procesos de carga rápida, no es el tiempo de carga el que determina el instante en que se debe dejar de suministrar carga a la batería sino variables como la temperatura, la tensión y la producción de gas, entre otros.

4.1.3 La sobrecarga como fenómeno no deseado en las baterías en estudio

Como se observa en la figura 4-1 mostrada en el apartado 4.1.1.1 la aceptación de carga disminuye rápidamente cuando la batería se acerca a la zona de plena carga (zona 3). A partir de esta zona, si se continúa aplicando una corriente de carga la batería se adentra en una zona ineficiente o zona de sobrecarga. En esta zona de sobrecarga, la energía suministrada a la batería no incrementa de forma importante la capacidad real de la batería y por el contrario produce aumentos significativos de la temperatura y de la producción de gases. La figura 4-2 y la figura 4-3 muestran el comportamiento típico durante la carga de las baterías de Ni-Cd y Ni-MH cuando se aplica una razón de carga de 1,0C a temperatura ambiente de 23 °C.

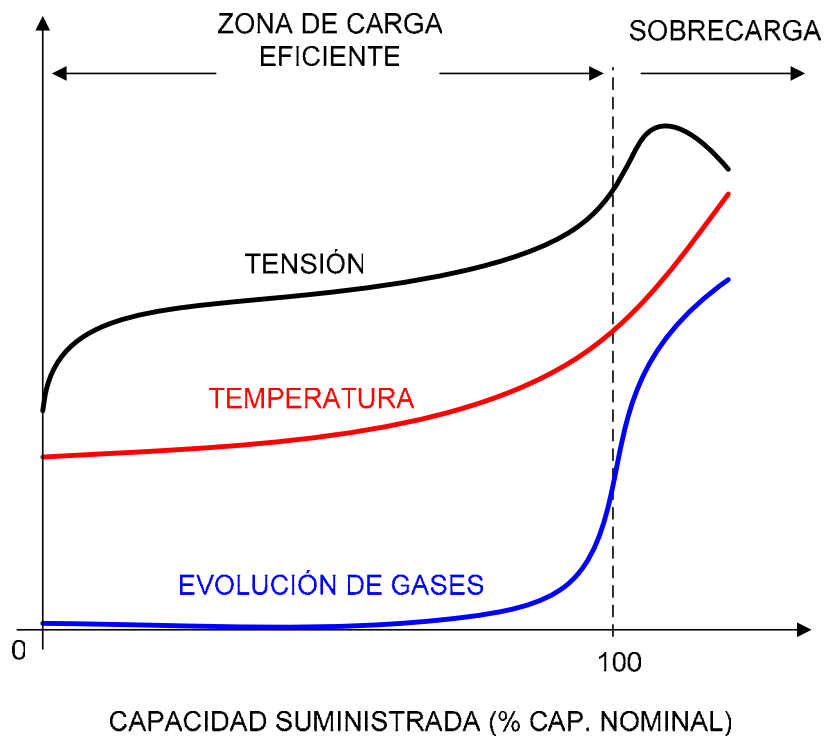


Figura 4-2. Evolución típica de la tensión, temperatura y la producción de gas en una batería de Ni-Cd cuando se aplica una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

Como se puede apreciar a simple vista en las figuras 4-2 y 4-3 la evolución de la tensión, la temperatura y la producción de gas en baterías de Ni-Cd y Ni-MH es bastante parecida. En realidad existen algunas diferencias significativas y que en ocasiones se utilizan para diferenciar la forma de realizar la carga o de determinar el instante en que la carga debe ser finalizada en una u otra tecnología de batería.

Algunas de estas diferencias están relacionadas con la evolución de la tensión y se basan fundamentalmente en que la variación que experimenta la tensión en la parte final de la carga es mayor en una batería de Ni-Cd que en una de Ni-MH.

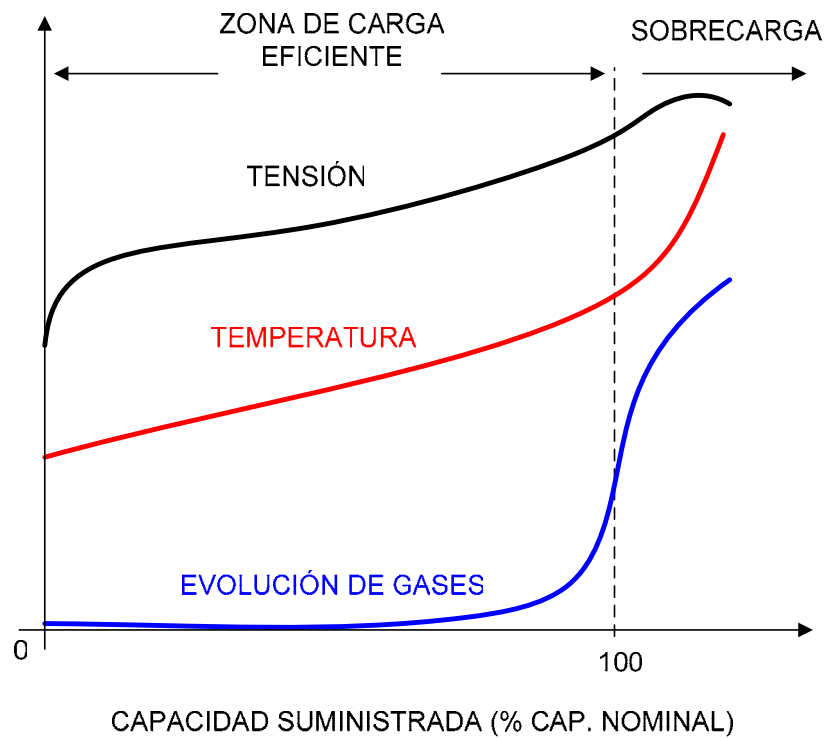


Figura 4-3. Evolución típica de la tensión, temperatura y la producción de gas en una batería de Ni-MH cuando se aplica una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

La variación pronunciada de la tensión en las baterías de Ni-Cd en la parte final de la zona de carga eficiente, posibilita la utilización de este parámetro para determinar el instante en que la carga comienza a perder su eficiencia y por el contrario, la corriente suministrada se invierte en producción de gas y aumento de la temperatura. Aunque la variación de la tensión en la parte final de la zona de carga eficiente en baterías de Ni-MH es menos significativa que en el caso de baterías de Ni-Cd, también puede utilizarse para determinar el fin de la carga, pero se requiere de mayor precisión de los elementos escogidos para realizar su medida.

Por otro lado, en la figura 4-3 se puede apreciar que el incremento en la temperatura es más significativo en las baterías de Ni-MH que en las baterías de Ni-Cd. Esto se debe fundamentalmente a que las reacciones electroquímicas durante la carga tienen una naturaleza endotérmica en las baterías de Ni-Cd y por el contrario, en el

caso de las baterías de Ni-MH la naturaleza de las reacciones electroquímicas es exotérmica.

Durante la carga de una batería de Ni-Cd se absorbe calor y la batería tiende a enfriarse aunque muy ligeramente. Solo es posible observar una disminución muy ligera de la temperatura cuando las razones de carga son bastante bajas al inicio de la carga. Cuando se incrementan las razones de carga, el efecto endotérmico de las reacciones electroquímicas que se producen en las baterías de Ni-Cd queda enmascarado por las pérdidas óhmicas que se producen al paso de la corriente eléctrica por los distintos elementos de la batería y por las propias reacciones parásitas que tienen lugar durante la carga.

En el caso de las baterías de Ni-MH la temperatura crece desde el propio comienzo del proceso de carga, aún cuando la razón de carga utilizada sea baja. Al final de la zona de carga eficiente y coincidiendo con un aumento de la producción de gas, se produce un cambio bastante significativo de la pendiente de la temperatura que puede ser utilizado para determinar la finalización de la carga o el paso a una razón de carga lo suficientemente baja como para evitar la sobrecarga de la batería.

De forma resumida se puede concluir que la sobrecarga produce efectos negativos sobre la batería, que pueden llegar a ser destructivos en un corto plazo o que acortan paulatinamente la vida cíclica de la batería. Algunos de los efectos negativos más importantes que produce la sobrecarga son la corrosión temprana de los electrodos y la pérdida del electrolito a través de la evolución de gas.

Para evitar los efectos indeseados producidos por la sobrecarga, sobre todo cuando se utilizan razones de carga altas (carga rápida), es necesario detener el proceso de carga cuando se perciba la entrada en esa zona de carga ineficiente. El estudio que se realiza a continuación es precisamente sobre la capacidad de la batería de asimilar carga rápida lo más eficientemente posible, tratando de evitar el funcionamiento en condiciones de sobrecarga prolongadas que provoquen daños irreversibles en la batería.

Toda la información que se presenta en las secciones siguientes, está relacionada con el comportamiento de las baterías bajo distintas razones de carga y en diferentes condiciones de temperatura, pero siempre evitando la sobrecarga de la batería. Para ello se ha utilizado un sensor de gas sensible al hidrógeno y que nos permite cortar el proceso de carga en el instante en que se detecta la presencia de este gas. La metodología de ensayos se detalla en el capítulo 3.

La presencia de hidrógeno marca con claridad la condición de sobrecarga de la batería, donde prácticamente toda la energía que se suministra a la batería no está convirtiendo el material activo sino participando en las reacciones electroquímicas que producen la electrólisis del agua y otros fenómenos dañinos para la batería, fundamentalmente, cuando se trabaja con razones de carga altas. Estas reacciones están asociadas con la pérdida de agua del electrolito y con aumentos de la temperatura.

De esta forma, el análisis que se realiza refleja el comportamiento de la batería durante la parte más eficiente del proceso de carga, que es en definitiva la parte del proceso de carga durante el cual es posible aplicar carga rápida. Una vez en la zona de sobrecarga, no tiene sentido continuar con razones de carga altas pues la vida de la batería se ve seriamente limitada.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA EN LA TECNOLOGÍA DE Ni-Cd

4.2.1 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd en función de la razón de carga utilizada a 23 °C de temperatura ambiente

Para comenzar el análisis de las características de carga de las baterías de Ni-Cd se establece una temperatura ambiente de 23 °C y se realizan repetidos ciclos de carga-descarga utilizando diferentes razones de carga. Las condiciones de la descarga se mantienen invariables durante todos los ciclos de carga-descarga analizados, de forma que las condiciones de la descarga no influyan en las

variaciones producidas por la razón de carga utilizada en cada caso (ver las consideraciones expuestas en el capítulo 3).

4.2.1.1 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,1C

Después de realizar los correspondientes ciclos de acondicionamiento, la primera prueba que se realiza a las baterías en estudio es una carga lenta utilizando una razón carga de 0,1C. La evolución típica de la tensión por celda de las baterías de Ni-Cd estudiadas cuando la razón de carga utilizada es 0,1C y la temperatura ambiente es de 23 °C se muestra en la figura 4-4.

Para estas condiciones de funcionamiento (razón de carga de 0,1C y temperatura de 23 °C) se define la capacidad nominal de cada batería. A partir de este momento todos los resultados serán expresados en función de la capacidad nominal de la batería. La razón de carga de 0,1C a temperatura ambiente de 23 °C servirá de referencia en el análisis de comportamiento de la batería a diferentes razones de carga y en diferentes condiciones de temperatura. La realización de este tipo de ensayo, característico de carga lenta, es un punto de partida en el estudio del comportamiento de la batería cuando se le somete a razones de carga cada vez más altas.

En la figura 4-4 se puede apreciar el rápido incremento que experimenta la tensión en el tiempo cuando la batería de Ni-Cd se aproxima a la parte final del proceso de carga, aún cuando la razón de carga utilizada es típica de un proceso de carga lenta (0,1C). La finalización de la carga se produce cuando se detecta hidrógeno a través de los sensores de gas dispuestos con este fin. Este rápido y significativo incremento en la tensión de la batería está relacionado con el inicio de la producción de hidrógeno y puede ser utilizado para detener el proceso de carga o continuar la carga pero con una razón de carga más baja (menor que 0,1C).

Como se puede observar en la figura 4-4 cuando la batería se aproxima a la zona donde finaliza la carga (debido a la detección de hidrógeno producido en el electrodo negativo) se produce una primera pendiente en la curva de tensión. Esta primera

pendiente está relacionada con una sobretensión en el electrodo positivo que da lugar a la evolución de oxígeno. Normalmente, este electrodo se diseña de forma que pueda resistir sobrecargas, ya que alcanza su plena carga antes que el electrodo negativo. El propio calor producido durante la evolución del oxígeno hace que disminuya la tensión de celda y la producción de oxígeno queda controlada.

Cuando se alcanza la carga total de la batería se sobrecarga el electrodo negativo y aumenta la producción de gas, oxígeno e hidrógeno. En este instante el proceso de carga se detiene, tratando de minimizar las pérdidas de electrolito.

La figura 4-5 muestra la evolución de la temperatura medida en la carcasa de la batería cuando se realiza la carga a 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

En la curva de temperatura de la figura 4-5 se puede comprobar con claridad la naturaleza endotérmica de las reacciones electroquímicas que se producen durante la carga de una batería de Ni-Cd. En este caso, se puede observar como la temperatura desciende desde el inicio de la carga y solo se incrementa después que se ha alcanzado aproximadamente el 80 por ciento de la capacidad nominal de la batería. La naturaleza endotérmica de las reacciones de carga en las baterías de Ni-Cd, posibilita que esta tecnología de baterías sea una buena opción cuando se necesite aplicar razones de carga altas para reducir drásticamente los tiempos de recarga.

Los principales índices del comportamiento promedio de una batería de Ni-Cd durante su carga, utilizando una razón de carga de 0,1C y a temperatura ambiente de 23 °C, se muestran en la tabla 4-1. En estas condiciones la carga de la batería se realiza en, aproximadamente 10 horas y prácticamente no se produce un aumento de temperatura con respecto a la temperatura de inicio de la carga. La aceptación de carga es buena y la eficiencia energética es de aproximadamente un 85 por ciento. La capacidad descargada cuando se utiliza una razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C, se establece como la capacidad nominal de la batería. La razón de descarga utilizada siempre fue de 0,2C y la tensión de finalización de la descarga se estableció en 1 V/celda.

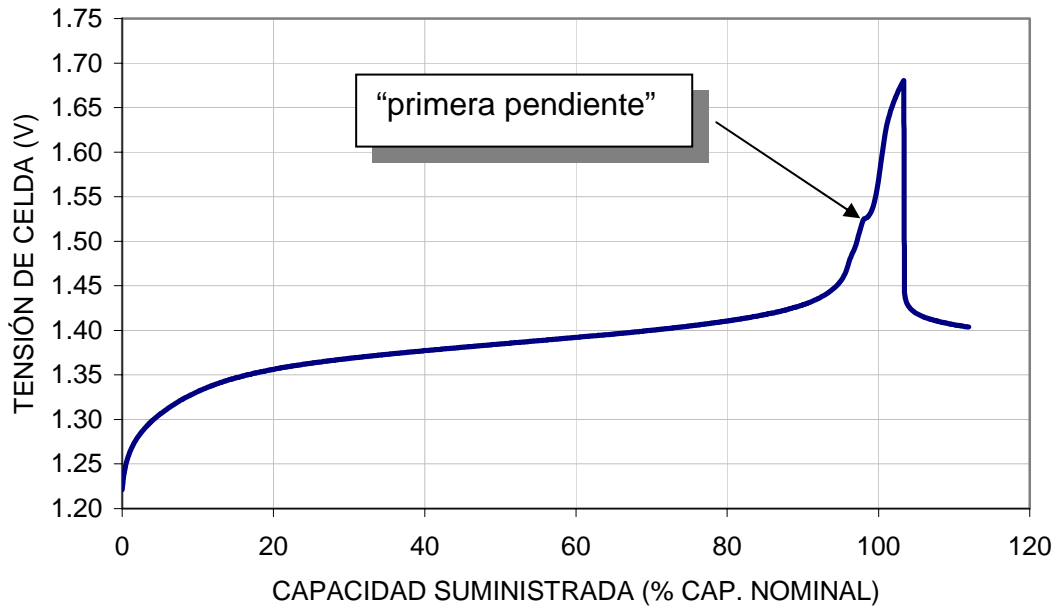


Figura 4-4. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

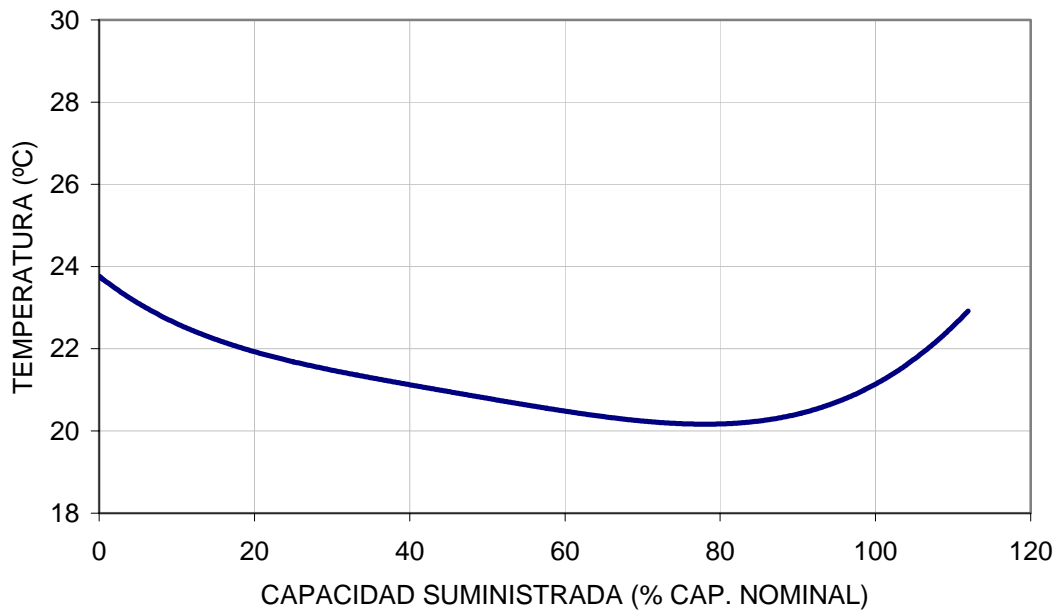


Figura 4-5. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,1C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	609
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	103,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	100
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,7
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	85,3
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	0

Tabla 4-1. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 0,1C y temperatura de 23 °C.

4.2.1.2 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,2C

Para continuar con el análisis de la influencia de la razón de carga en el comportamiento de baterías de Ni-Cd, se procedió a incrementar la razón de carga hasta 0,2C. La figura 4-6 muestra la evolución típica de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,2C. Bajo estas condiciones, el comportamiento promedio observado en las baterías estudiadas fue también muy positivo. Prácticamente, no se observaron incrementos de temperatura durante el proceso de carga, como se puede apreciar en la figura 4-7.

La reducción del tiempo de carga, respecto al tiempo necesitado para realizar la carga a 0,1C, fue aproximadamente un 48,6 por ciento (prácticamente el tiempo de carga se reduce de 10 a 5 horas). La aceptación de carga superó el 97 por ciento. La capacidad que fue posible descargar utilizando esta razón de carga de 0,2C se mantuvo por encima del 97 por ciento y la eficiencia energética no varió significativamente con respecto a la eficiencia energética obtenida al utilizar la razón

de carga de 0,1C. En la tabla 4-2 se muestra un resumen de las características típicas de funcionamiento cuando se utilizan razones de carga de 0,2C.

No obstante, es importante destacar que la primera pendiente en la curva de tensión de la figura 4-6 se produce de forma más prematura que cuando fue utilizada la razón de carga de 0,1C. La prontitud de este primer incremento importante de la tensión de celda respecto a la finalización de la carga debido a la detección de hidrógeno, puede someter al electrodo positivo de la batería a una sobrecarga más prolongada. Este electrodo es reforzado en su proceso de fabricación para resistir estas sobrecargas. De cualquier manera, la aceptación de carga lograda durante la realización de estas pruebas de carga a 0,2C fue muy alta y prácticamente se pudo descargar toda la capacidad suministrada a la batería (el 97 por ciento de la capacidad suministrada fue descargado).

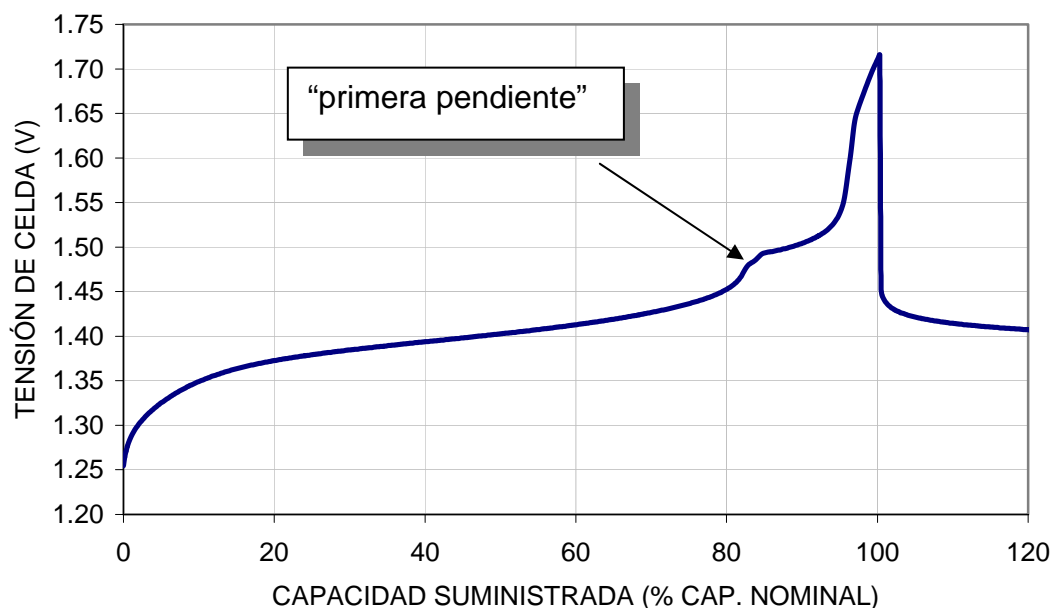


Figura 4-6. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

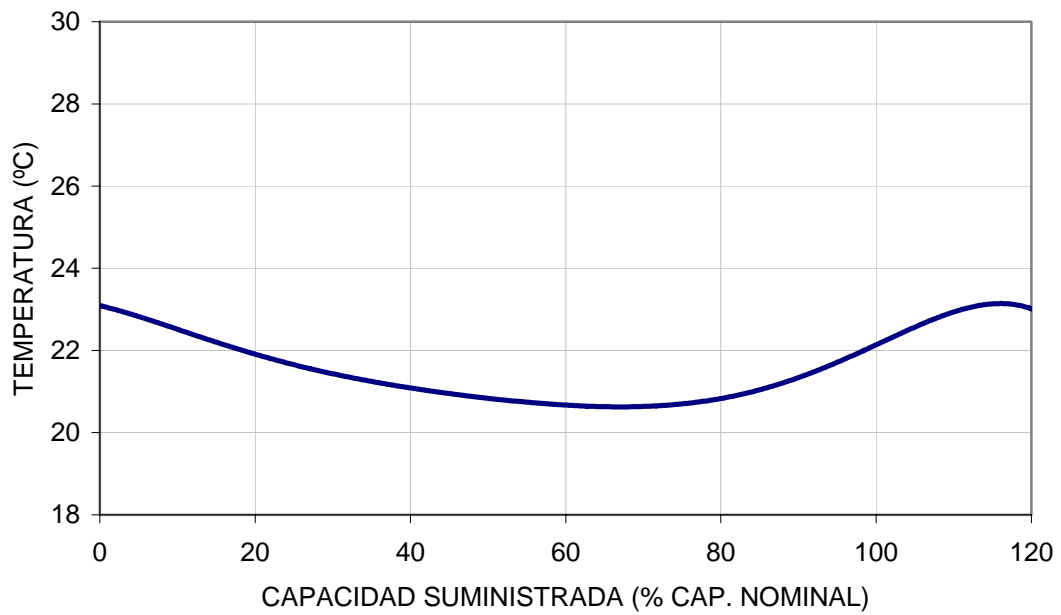


Figura 4-7. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,2C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	296
REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE CARGA (% DE 0,1C)	48,6
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	100,3
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP NOMINAL)	97,5
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,2
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	84,4
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	0

Tabla 4-2. Resumen de características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd.
Razón de carga de 0,2C y temperatura de 23 °C.

4.2.1.3 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 0,5C

Una razón de carga de 0,5C no debe considerarse como una carga lenta. Esta razón de carga permite recargar una batería de Ni-Cd en aproximadamente dos horas. Este tiempo representa algo menos del 20 por ciento del tiempo necesario para recargar la batería con una razón de carga de 0,1C. Según el Consorcio de Baterías Avanzadas de los Estados Unidos (USABC por sus siglas en inglés), los requerimientos en cuanto a los tiempos de recarga para baterías de media y gran capacidad (aplicaciones que funcionan en regímenes cíclicos de carga-descarga) se establecen entre 3 y 6 horas para que la batería alcance su estado de plena carga desde su estado de descarga total. No obstante, se están proponiendo nuevas exigencias que permitan la recarga de forma más rápida, de tal manera que la batería se pueda cargar entre un 40 y un 80 por ciento de su capacidad nominal en menos de 15 minutos.

La evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante su carga a 0,5C en función de la capacidad suministrada a la batería se puede observar en la figura 4-8. En esta figura se puede observar que la primera pendiente de la curva de tensión se adelanta aún más y se produce aproximadamente, cuando la carga suministrada está entre el 50 y el 60 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

La naturaleza endotérmica de las reacciones electroquímicas que se producen en las baterías de Ni-Cd durante los procesos de carga, continúa proporcionando un ambiente propicio para la aplicación de corrientes elevadas de carga. Como se puede observar en la figura 4-9, el incremento de temperatura que se produce al terminar el proceso de carga es de aproximadamente 2 °C. No obstante, ya no se percibe con claridad la disminución de la temperatura de la batería debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones electroquímicas. Éstas quedan enmascaradas por el aumento de la temperatura debido a las pérdidas óhmicas y a las reacciones anticipadas de sobrecarga.

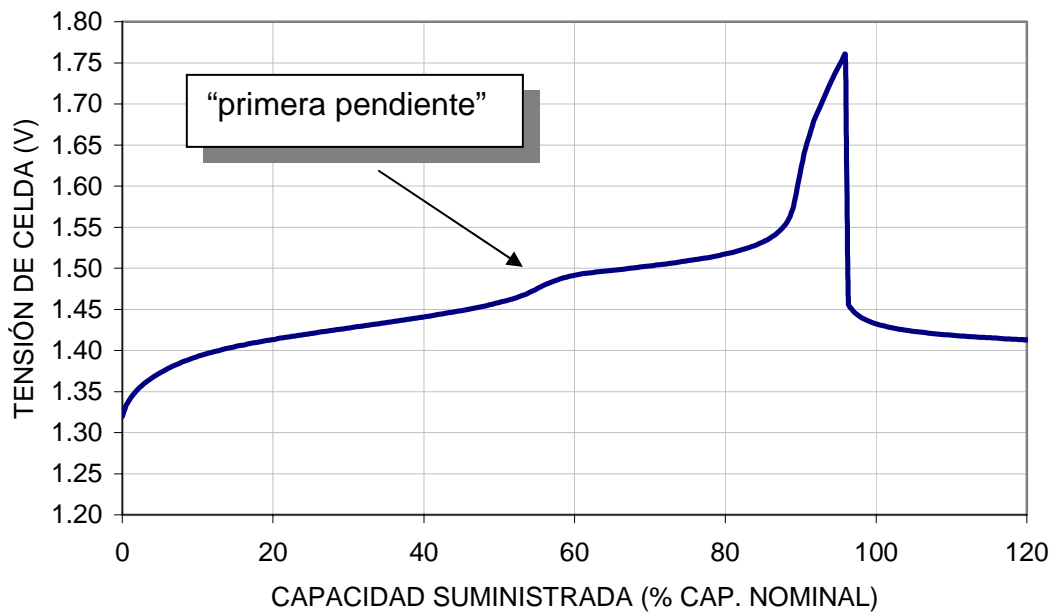


Figura 4-8. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.

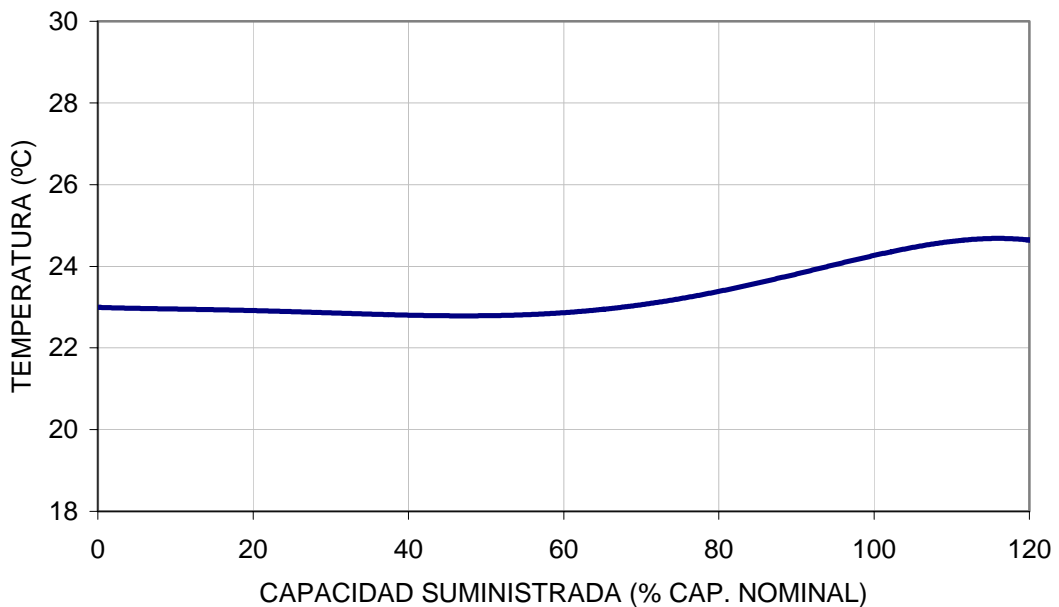


Figura 4-9. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,5C y a temperatura ambiente de 23 °C.

Cuando se detecta la evolución de hidrógeno la carga se detiene inmediatamente y no se continúa aplicando carga adicional. Básicamente, ésta es la razón por la que no se observan aumentos significativos de la temperatura al final del proceso de carga. La temperatura es una variable de evolución lenta y está asociada con las reacciones de sobrecarga, que fundamentalmente se producen en la parte final del proceso de carga y que dan lugar a la evolución del hidrógeno.

En la tabla 4-3 se pueden revisar de forma resumida algunas de las características más importantes observadas durante los ensayos realizados con una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	113
TIEMPO DE CARGA (% DEL TIEMPO USADO A 0,1C)	18,6
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	95,9
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	93,5
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,5
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	82,2
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	2

Tabla 4-3. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd.
Razón de carga de 0,5C y temperatura de 23 °C.

La capacidad de la batería que fue posible descargar descendió, hasta aproximadamente el 93 por ciento de la capacidad nominal de la batería. Este resultado puede considerarse bueno, teniendo en cuenta que más de un 90 por ciento de la capacidad nominal de la batería puede estar disponible después de una recarga. Evidentemente, si existe la posibilidad de continuar la recarga de la batería

utilizando razones de carga lo suficientemente bajas (menores que 0,1C) que no sobrecarguen de forma excesiva la batería, la capacidad disponible se incrementa.

La aceptación de carga permanece alta durante esta prueba (por encima del 97 por ciento) y la eficiencia energética desciende un 3 por ciento aproximadamente respecto a la eficiencia energética registrada cuando la razón de carga se fija en 0,1C (carga lenta).

4.2.1.4 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 1,0C

Una razón de carga de 1,0C es considerada sin lugar a dudas una razón de carga rápida y su utilización sobre una batería de Ni-Cd permite reducir el tiempo de carga a menos de una hora. El problema fundamental en este caso, está relacionado con la cantidad de carga que es posible suministrar a la batería en estas condiciones sin producir una excesiva sobrecarga, es decir deteniendo el proceso de carga rápida cuando se detecta la producción de hidrógeno.

La curva de tensión de celda mostrada en la figura 4-10 es un ejemplo de la evolución de la tensión de una batería de Ni-Cd cuando se le aplica una razón de carga de 1,0C a 23 °C. La primera pendiente que se produce en la curva de tensión, se adelanta aún más que en el resto de casos analizados en las secciones anteriores. En este caso se produce entre un 20 y 30 por ciento de capacidad suministrada respecto a la capacidad nominal de la batería.

Cuando se aplica una razón de carga de 1,0C se produce un aumento de la temperatura de aproximadamente 5 °C, a diferencia de los casos analizados en las secciones anteriores, donde prácticamente no existen incrementos significativos de la temperatura.

La figura 4-11 muestra la evolución típica de la temperatura en una batería de Ni-Cd cuando se carga con una razón de carga de 1,0C. Como se puede apreciar en esta figura, el crecimiento de la temperatura se produce desde el propio comienzo de la carga y por tanto se cancela el efecto producido por la naturaleza endotérmica de las reacciones electroquímicas. Aún cuando la temperatura se incrementa desde el

inicio de la carga cuando se aplica una razón de carga de 1,0C, es importante señalar que la pendiente de la temperatura no es grande y poco antes de finalizar la carga (menos de 5 min.) se produce un cambio de pendiente de 0,1 °C/min. a 0,2 °C/min. Por este motivo, no se obtiene al final de la parte eficiente del proceso de carga un incremento demasiado grande de la temperatura.

Los índices más importantes a través de los cuales se puede resumir el comportamiento de una batería de Ni-Cd, cuando se carga con una razón de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C se pueden observar en la tabla 4-4.

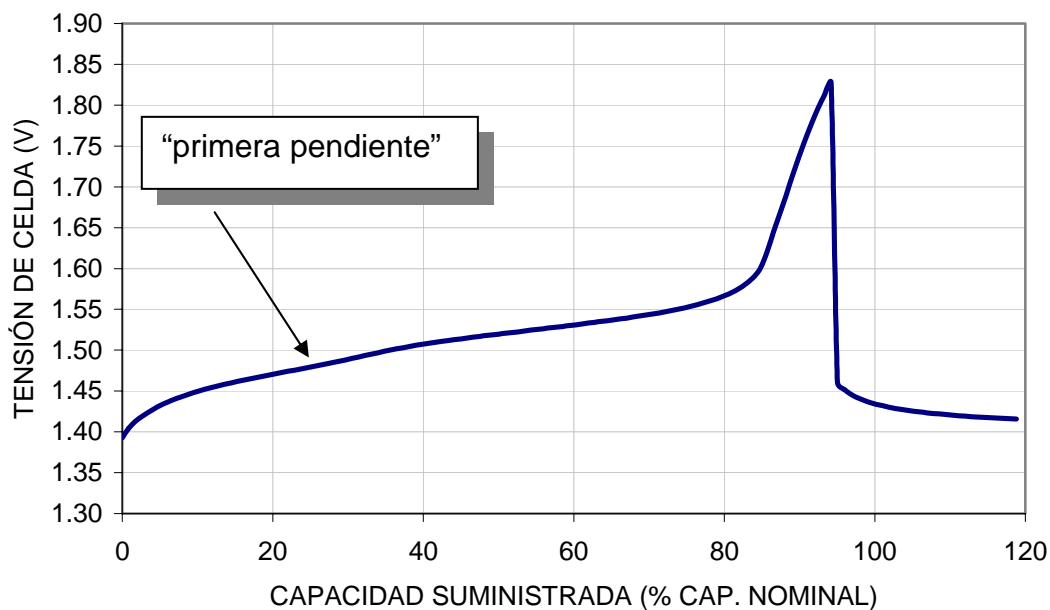


Figura 4-10. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

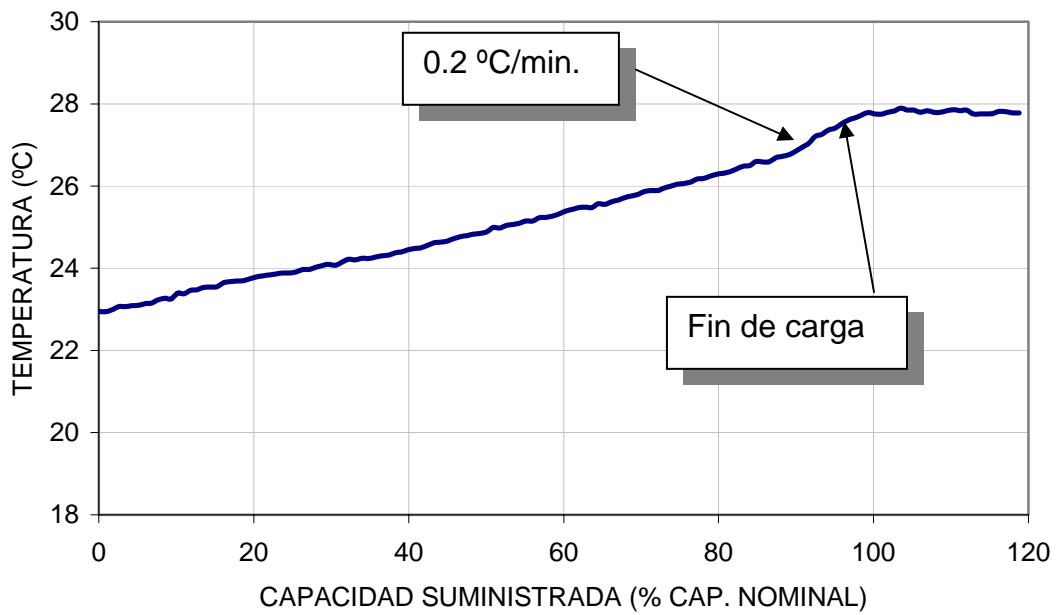


Figura 4-11. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	55
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	94,2
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	91,5
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,1
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	79,4
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	4,5

Tabla 4-4. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 1,0C y temperatura de 23 °C.

Como se puede observar en la tabla 4-4, la capacidad que es posible descargar cuando la batería se carga con una razón de 1,0C, es de aproximadamente el 91 por ciento de la capacidad nominal de la batería. No obstante, en estas condiciones el tiempo de carga se reduce drásticamente y desciende hasta aproximadamente el 9 por ciento (menos de una hora) del tiempo necesitado para cargar la batería utilizando una razón de carga de 0,1C (carga lenta).

La aceptación de carga se mantiene bastante alta, aún cuando la razón de carga utilizada es alta (1,0C) y esto se debe fundamentalmente a que el proceso de carga se detiene cuando finaliza su parte más eficiente, evitando la zona de sobrecarga.

La eficiencia energética continúa con un ligero descenso producto del aumento de la corriente de carga y en este caso decrece hasta aproximadamente el 79 por ciento. Es decir que solo se aprovecha un 79 por ciento de la energía que es necesaria suministrar a la batería para cargarla. Durante la carga a 0,1C la eficiencia energética lograda fue de aproximadamente el 85 por ciento, por tanto se ha perdido cerca de un 6 por ciento debido al aumento de la razón de carga hasta 1,0C.

4.2.1.5 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-Cd a una razón de carga de 2,0C

La aplicación de una carga rápida utilizando una razón de carga de 2,0C permite disminuir drásticamente el tiempo de recarga de la batería. No obstante, la aplicación de esta razón de carga tiene inconvenientes que se deben analizar, para poder alcanzar un compromiso acerca de la conveniencia o no de su utilización en una aplicación específica.

La figura 4-12 muestra la evolución típica de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando se carga con una razón de 2,0C. La sobretensión producida en la batería de Ni-Cd desde el propio comienzo de la carga hace que la sobretensión de polarización en el electrodo positivo sea mayor y se produzca de forma muy anticipada (por debajo del 10 por ciento de la capacidad suministrada con respecto a la capacidad nominal de la batería). Al inicio de la carga se observa una deformación de la curva de tensión que no se había observado hasta el momento y que está

relacionada con los procesos químicos de polarización de los electrodos. Este fenómeno se manifiesta en forma de una sobretensión instantánea por encima de 1,55 V/celda al comienzo de la carga, seguido de un rápido descenso de aproximadamente 30 mV/celda durante los primeros minutos de la carga y nuevamente continúa con el crecimiento normal en función del estado de carga.

Durante la carga a 2,0C, al igual que cuando se aplica una razón de carga de 1,0C, la temperatura crece desde el mismo comienzo del proceso de carga. Cuando la razón de carga es 2,0C la pendiente de crecimiento de la temperatura es mayor que cuando se aplica la razón de carga de 1,0C. La pendiente de crecimiento de la temperatura se establece en 0,4 °C/min. desde que la batería alcanza el 40 por ciento de su capacidad nominal. El incremento de la temperatura cuando se llega al final del proceso de carga es de aproximadamente 10 °C (ver figura 4-13).

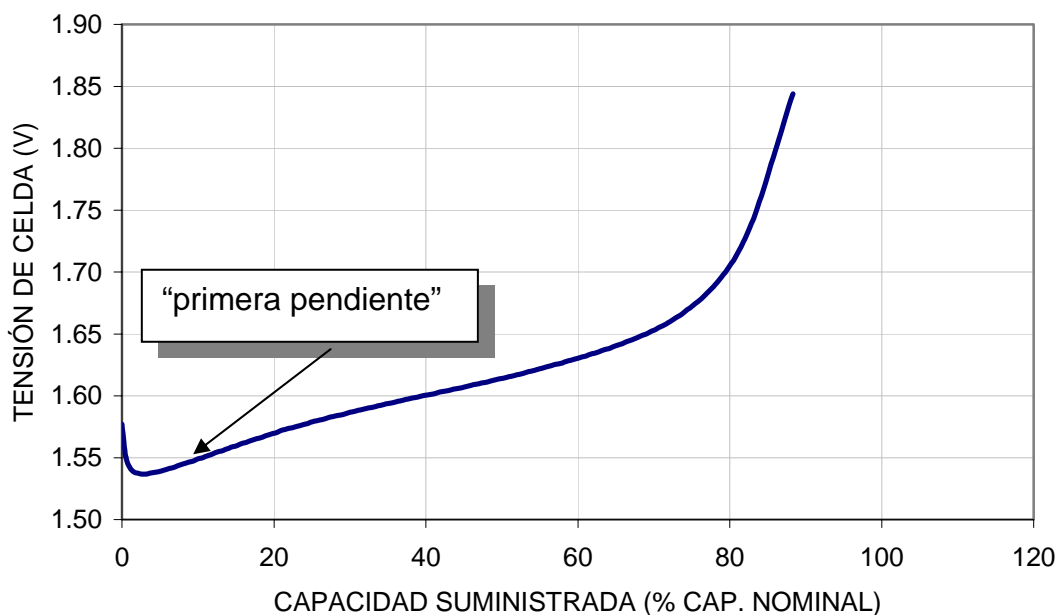


Figura 4-12. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 2,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

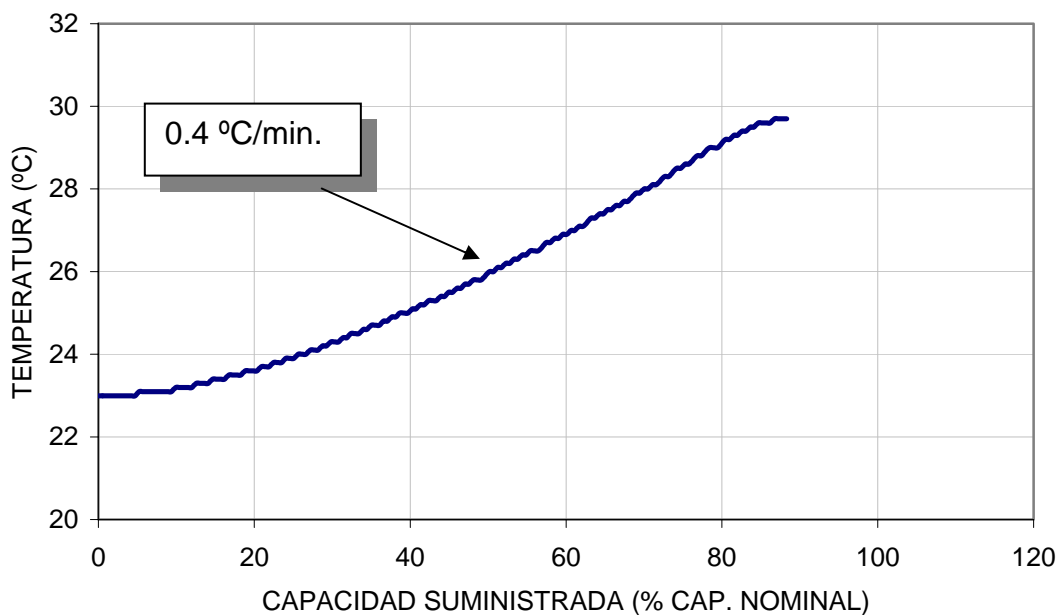


Figura 4-13. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 2,0C y a temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 2,0C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	26,0
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	88,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	85,7
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,9
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	74,5
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	6,0

Tabla 4-5. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 2,0C y temperatura de 23 °C.

La tabla 4-5 muestra las magnitudes de los principales índices asociados al comportamiento de una batería de Ni-Cd cuando se carga utilizando una razón de 2,0C.

A pesar de que la aceptación de carga se sigue manteniendo alta (aproximadamente un 97 por ciento), la capacidad que puede ser extraída de la batería disminuye significativamente, descendiendo hasta un 83,3 por ciento de la capacidad nominal de la batería. En estas condiciones no se puede considerar que la batería esté completamente cargada. Generalmente se considera una batería totalmente cargada, cuando la capacidad que puede ser extraída durante la descarga siguiente supera al menos un 90 por ciento de la capacidad nominal de la batería (manteniendo las mismas condiciones de la descarga para las que se definió la capacidad nominal de la batería).

La eficiencia energética durante los ensayos realizados con la razón de carga de 2,0C disminuyó hasta el 75 por ciento aproximadamente, debido fundamentalmente al incremento de la temperatura producido desde el propio comienzo del proceso de carga.

El tiempo empleado para realizar la carga utilizando la razón de 2,0C fue solo de un 4,2 por ciento del tiempo que se necesita para realizar la carga a razón de 0,1C (carga lenta). No obstante, los inconvenientes mencionados anteriormente acerca de la capacidad que puede ser cargada y posteriormente descargada en estas condiciones, limita grandemente el aprovechamiento que puede hacerse de la capacidad nominal de la batería. Además de los inconvenientes ya mencionados a cerca de la sobrecarga a que se somete el electrodo positivo, con la consiguiente producción de oxígeno.

De aplicar esta razón de carga de forma cíclica, se pueden producir pérdidas importantes de electrolito y dependiendo de la temperatura ambiente donde tenga lugar se pueden alcanzar los límites máximos de funcionamiento normal. El funcionamiento repetido a temperaturas elevadas tiene una influencia directa sobre la vida cíclica de la batería, reduciendo el número de ciclos de carga-descarga a que puede ser sometida durante toda su vida útil.

4.2.1.6 Conclusiones acerca del comportamiento de las baterías de Ni-Cd a diferentes razones de carga a 23 °C

En esta sección se resume de forma gráfica la evolución de los principales índices, utilizados en las secciones anteriores para describir el comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd.

Como el objetivo fundamental de este trabajo es la carga rápida y por tanto, el lograr la máxima disminución posible de los tiempos de carga, la figura 4-14 muestra la evolución que siguen los tiempos de carga cuando se incrementa la razón de carga. Hay que tener en cuenta que estos tiempos de carga son aquellos que se miden desde el comienzo de la carga de una batería totalmente descargada hasta que la batería alcanza su estado de sobrecarga final, debido a la detección de hidrógeno.

Las sobrecargas que se producen durante el proceso de carga, sobre todo a medida que se aumenta la razón de carga por encima de 0,1C, se deben a reacciones secundarias debidas a la sobretensión de polarización del el electrodo positivo y normalmente están asociadas con pérdidas de agua y producción de calor. En las gráficas de tensión de celda para cada razón de carga aplicada, se pudo apreciar como la primera pendiente asociada con estos fenómenos, aparecía en la curva de tensión de forma más temprana. De las gráficas de tensión estudiadas se puede precisar que para cualquier razón de carga aplicada (entre 0,1C hasta 1,0C) el cambio de pendiente en la tensión de celda se produce aproximadamente, entre 1,45 y 1,50 V/celda. Cuando se utilizó la razón de carga de 2,0C la tensión de celda se incrementó por encima de 1,45 V/celda desde el comienzo de la carga.

Estas reacciones químicas que dan lugar además a la producción de oxígeno son inevitables, y aunque se ven reforzadas cuando se aumentan las razones de carga tienen consecuencias mucho menores que las reacciones electroquímicas que conducen a la evolución de hidrógeno, cuando se carga completamente el electrodo negativo o simplemente cuando se sobrecarga. La evolución de hidrógeno al final de la carga es grande y fácilmente detectable por un sensor sensible a este gas.

De cualquier forma, una vez detectada la presencia de hidrógeno es peligroso continuar aplicando una razón de carga elevada, ya sea por las pérdidas de agua que eso supone, como por lo peligrosa que puede suponer una alta concentración de este gas en un volumen de aire determinado (por encima de 4 por ciento en volumen de aire puede ser una mezcla explosiva).

El tiempo de carga medido cuando se aplicó la razón de carga de 0,1C es utilizado como base para calcular el porcentaje de tiempo que representa la aplicación de una razón de carga superior, en este caso por ejemplo, 0,2C, 0,5C, 1,0C y 2C. Los tiempos de carga oscilan entre las 10 horas (cuando la razón de carga es 0,1C) y los 25 minutos (cuando la razón de carga es de 2,0C). En cualquier caso, la carga se detuvo cuando los sensores de hidrógeno detectaron este gas.

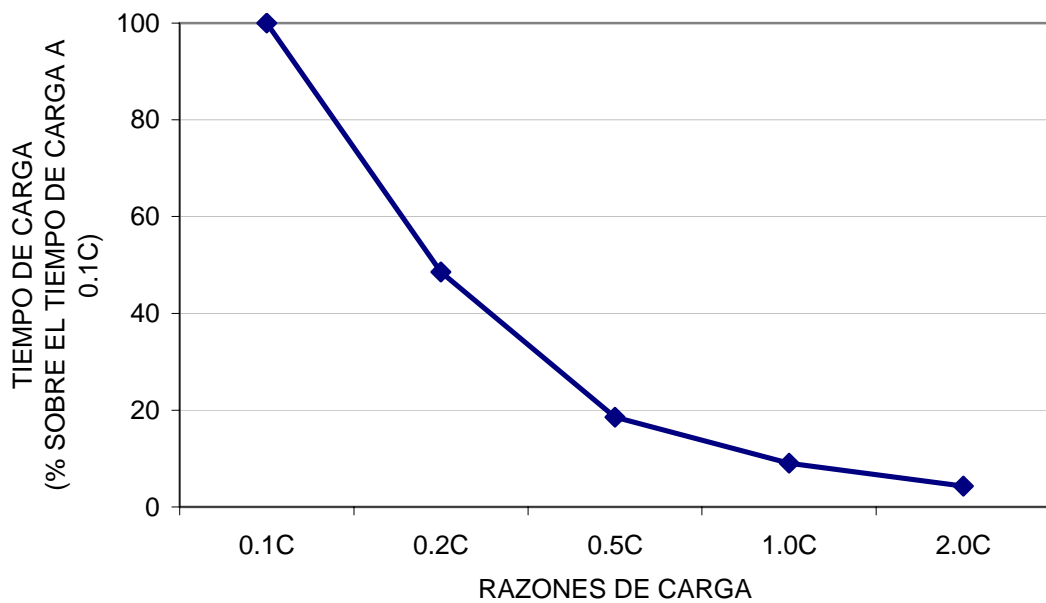


Figura 4-14. Tiempo de carga de una batería de Ni-Cd en función de la razón de carga aplicada a temperatura ambiente de 23 °C.

Por otro lado, en la figura 4-15 se puede observar como se produce una disminución significativa de la capacidad que es posible descargar de una batería de Ni-Cd cuando se incrementa la razón de carga utilizada. Cuando se utiliza una razón de carga de 2,0C la capacidad que puede ser extraída de la batería es menor que el 90 por ciento de la capacidad nominal. Evidentemente, esta condición limita

sensiblemente la autonomía del sistema al que las baterías sirven como fuente de energía. En estos casos, es importante tener en cuenta un compromiso entre el tiempo mínimo que se necesita para hacer la recarga de la batería y la cantidad de carga que es posible suministrar a la batería en condiciones que no provoquen una sobrecarga continuada, para que posteriormente la batería pueda ser descargada cumpliendo los requisitos impuestos por el sistema donde funcionen.

No obstante, como se puede apreciar en la figura 4-15, se obtuvieron resultados que pueden calificarse de buenos cuando se utilizaron razones de carga de hasta 1,0C. Para esta razón de carga (1,0C) fue posible descargar aproximadamente un 91 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

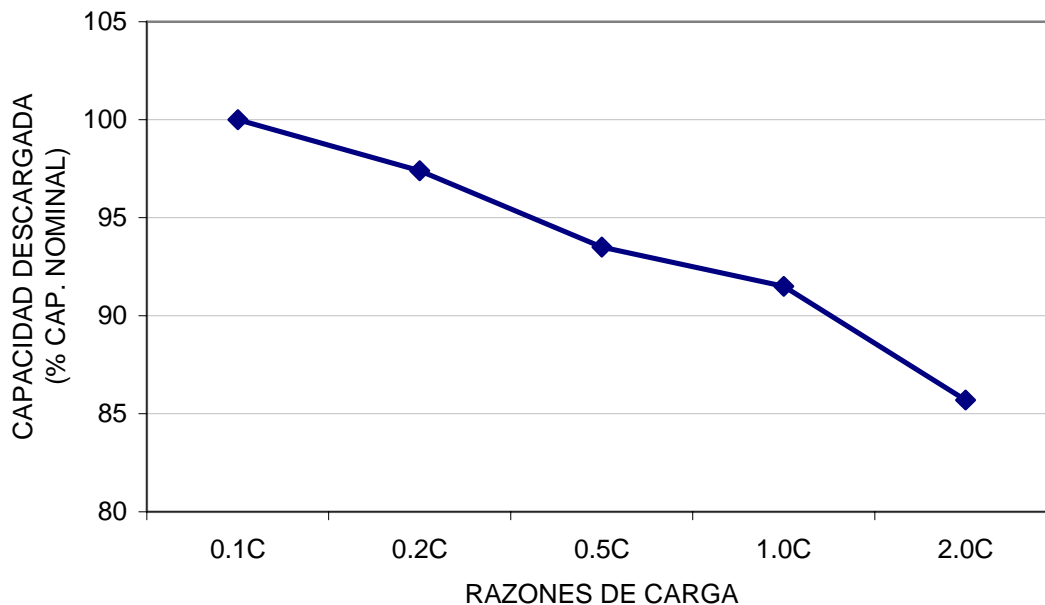


Figura 4-15. Capacidad descargada de una batería de Ni-Cd en función de la razón de carga aplicada a temperatura ambiente de 23 °C.

Durante todos los ensayos realizados la carga se ha detenido cuando se ha detectado la producción de hidrógeno, instante que representa de forma bastante fiable la entrada en sobrecarga. Hasta este instante la carga se desarrolla de manera bastante eficiente. Como muestra de ello, en la figura 4-16 se puede observar como la aceptación de carga se mantiene en valores bastante altos. La aceptación de carga es un índice a través del cual se puede valorar la eficiencia del proceso de

carga, ya que relaciona la capacidad que es descargada de la batería con la que fue necesaria suministrarle durante el proceso de carga. Los valores de aceptación de carga de la figura 4-16 están relacionados con ciclos completos de carga-descarga, por lo que también representan la pérdida de eficiencia producida durante la descarga de la batería. Aunque la razón de descarga utilizada siempre fue de 0,2C (razón de descarga baja) con el fin de aislar lo más posible su efecto sobre la eficiencia del proceso de carga, siempre existe una influencia, fundamentalmente marcada por el carácter exotérmico de las reacciones electroquímicas que se producen durante la descarga. Esto permite pensar que se obtienen eficiencias durante la carga más altas aún que las mostradas en la figura 4-16.

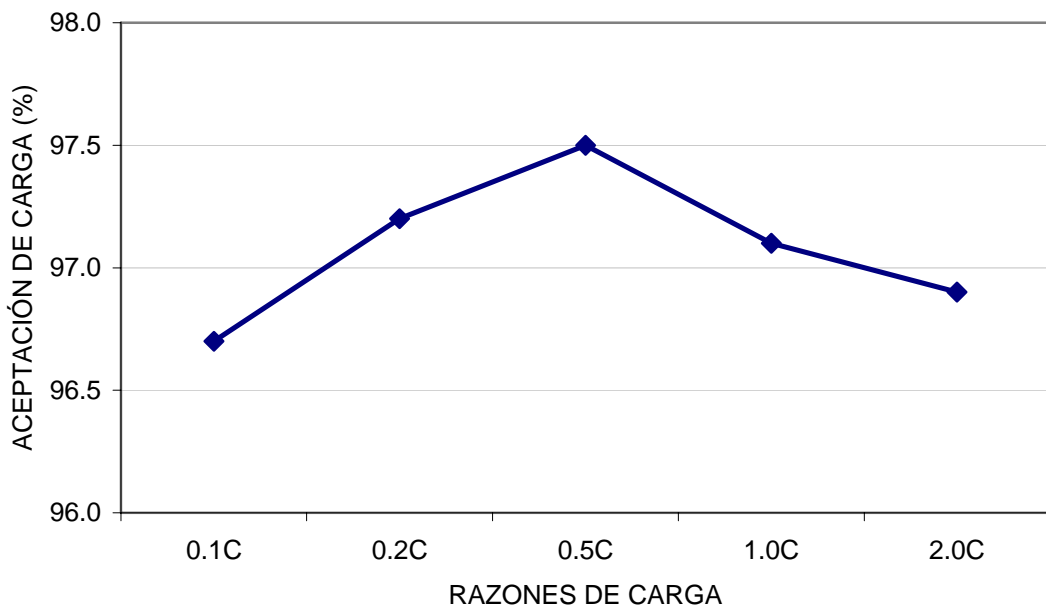


Figura 4-16. Aceptación de carga de una batería de Ni-Cd en función de la razón de carga aplicada a temperatura ambiente de 23 °C.

A medida que se incrementa la razón de carga aplicada a una batería de Ni-Cd se comprueba que se produce la anulación del efecto endotérmico de las reacciones electroquímicas. Esto hace que se produzca un aumento de la temperatura que es mayor a medida que aumenta la razón de carga aplicada.

En la figura 4-17 se puede observar como para razones de carga bajas prácticamente no se percibe un aumento de la temperatura de la batería. A partir de

la razón de carga de 0,5C comienza a producirse un aumento de la temperatura de la batería que puede superar los 11 °C sobre la temperatura ambiente de 23 °C cuando la razón de carga aplicada es de 2,0C. Fundamentalmente, cuando se aplican razones de carga altas, es importante tener en cuenta la temperatura medioambiental donde se encuentra funcionando la batería, de forma que los incrementos de temperatura producidos durante la carga no superen los límites de funcionamiento normal de la batería y por tanto, se puedan evitar daños físicos que acorten su vida cíclica.

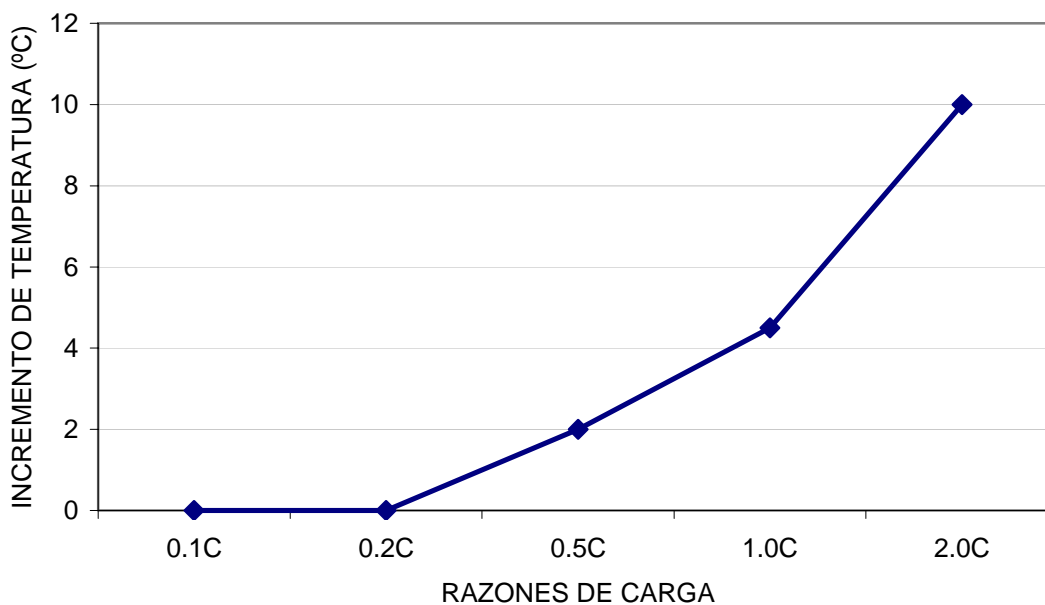


Figura 4-17. Incremento sobre la temperatura ambiente de 23 °C para diferentes razones de carga en baterías de Ni-Cd.

Como consecuencia del aumento de la razón de carga se produce una disminución significativa de la eficiencia energética del proceso de carga-descarga de la batería. Una disminución de la eficiencia energética del proceso de carga-descarga conlleva fundamentalmente, a sobredimensionar los equipos dedicados a la carga de la batería (cargadores de baterías). Las tensiones y corrientes que se necesitan durante un proceso de carga rápida son mucho mayores que las necesarias cuando se emplean razones de carga bajas. Para llevar una batería hasta un mismo estado de carga es necesaria una mayor cantidad de energía cuando se utiliza carga rápida

que cuando se utiliza una carga lenta. Todas las reacciones asociadas con los procesos de sobrecarga y las caídas óhmicas debidas a la circulación de la corriente eléctrica durante la carga, producen calor y gases y por tanto, pérdidas.

La figura 4-18 muestra el decrecimiento que se produce en la eficiencia energética del proceso de carga-descarga cuando se aplican a la batería diferentes razones de carga. Durante la carga a 2,0C se produce una caída de aproximadamente el 10 por ciento de la eficiencia energética. Esto puede traer consecuencias importantes sobre los costes de funcionamiento del sistema, tanto por la inversión inicial (cargadores de baterías sobredimensionados para poder cumplir con las exigencias de la carga rápida) como por los costes de explotación del sistema (costes de la energía que se pierde durante los procesos de carga rápida)

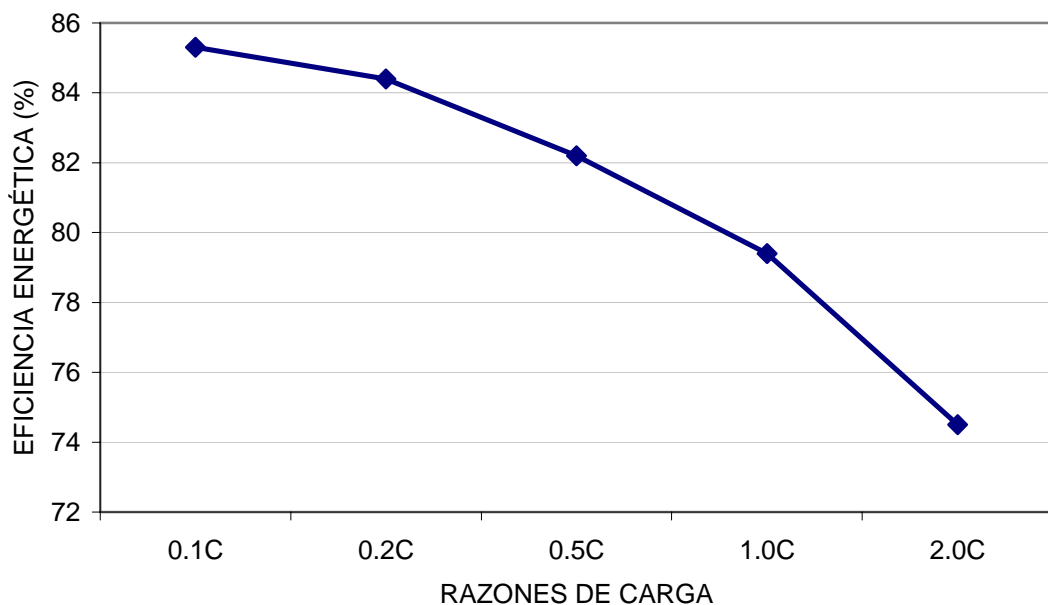


Figura 4-18. Eficiencia energética para diferentes razones de carga y temperatura ambiente de 23 °C.

En sistemas pequeños la pérdida de eficiencia debida a la aplicación de carga rápida pudiera ser admitida (baterías pequeñas de telefonía móvil, juguetes, etc.) pero en sistemas grandes, como los que ocupan a este trabajo, estas pérdidas deben ser analizadas con rigurosidad. Las potencias y los niveles de energía que se manejan

cuando se utilizan baterías de media y gran capacidad son elevadas y por tanto el rendimiento del sistemas debe ser tenido muy en cuenta.

Hasta ahora todo el análisis realizado ha sido en baterías de Ni-Cd cuando se le han aplicado diferentes razones de carga y a una temperatura ambiente de 23 °C. El comportamiento de una batería está bastante influenciado por la temperatura de funcionamiento. En este sentido, sería conveniente analizar el comportamiento de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con diferentes regímenes de carga, como se ha visto hasta ahora, pero a diferentes temperaturas de funcionamiento.

4.2.2 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-Cd bajo distintas razones de carga y en función de la temperatura ambiente

El tiempo requerido para realizar ensayos con baterías, y sobre todo baterías de media y gran capacidad es bastante grande (en ocasiones un ciclo de carga-descarga tiene una duración de más de 24 horas). Esta problemática se puede constatar en el capítulo 3. Por este motivo, y además por ser el comportamiento de las baterías de Ni-Cd bajo condiciones de carga rápida, el que más interesa en este trabajo, solo se realizará el análisis de comportamiento a diferentes temperaturas, bajo razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C.

Por otro lado, las temperaturas que van a ser consideradas en este trabajo son aquellas donde es más probable se realice la carga de una batería. En este sentido, se considerará el comportamiento durante la carga cuando se fija la temperatura de la cámara térmica en 5 °C, 15 °C, 23 °C y 33°C. Temperaturas superiores de funcionamiento pueden ser peligrosas sobre todo si se aplican razones de carga lo suficientemente altas como para hacer crecer la temperatura de la batería por encima de la máxima permitida (consideraciones de diseño y especificadas por el fabricante).

4.2.2.1 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 0,5C

4.2.2.1.1 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 0,5C

El análisis del comportamiento de la batería de Ni-Cd cuando funciona bajo una razón de carga de 0,5C y temperatura de 23 °C se realiza en el apartado 4.2.1.3. Este análisis sirve de base comparativa para analizar el comportamiento de la batería cuando se carga a 0,5C a diferentes temperaturas. La evolución de la tensión, de la temperatura y los principales índices de comportamiento se pueden observar en las figuras 4-8 y 4-9 y en la tabla resumen 4-3 de dicho apartado.

4.2.2.1.2 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 0,5C

Como se puede apreciar en las figuras 4-19 y 4-20, tanto la evolución de la tensión de celda como la evolución de la temperatura de la batería no difieren significativamente de las características observadas cuando se utiliza esta misma razón de carga y una temperatura de 23 °C. No obstante, se puede comprobar que la primera pendiente de la curva de tensión de celda se produce de forma anticipada. Cuando la temperatura es de 23 °C el cambio de la primera pendiente se produce entre un 50 y un 60 por ciento de la capacidad suministrada a la batería y cuando la temperatura se eleva a 33 °C, el primer cambio de la pendiente se observa entre un 40 y un 50 por ciento. Es decir, al elevar la temperatura de funcionamiento de la batería, se anticipan las reacciones secundarias que producen efectos indeseados (pérdidas) en el proceso de carga. En la figura 4-20, se puede observar como el aumento de temperatura también se produce de forma prematura cuando aproximadamente se ha cargado un 40 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

No obstante, el crecimiento de la temperatura al finalizar la carga es de apenas 2 °C sobre la temperatura ambiente de 33 °C establecida para este tipo de ensayo de carga. Una razón de carga de 0,5C puede ser aplicada sin ningún tipo de problemas siempre y cuando el proceso de carga sea detenido producto de la pérdida de su eficiencia al comienzo de la producción de gas, fundamentalmente hidrógeno. Como

ya se ha explicado, este punto a partir del cual se produce hidrógeno marca el comienzo de la parte más ineficiente del proceso de carga, donde prácticamente toda la energía que se suministra a la batería es consumida en procesos electrolíticos, asociados con la pérdida de agua del electrolito de las baterías.

La tabla 4-6 muestra un resumen de los principales índices de comportamiento de las baterías de Ni-Cd cuando son sometidas a repetidos ciclos de carga-descarga utilizando una razón de carga de 0,5C y a temperatura ambiente de 33 °C.

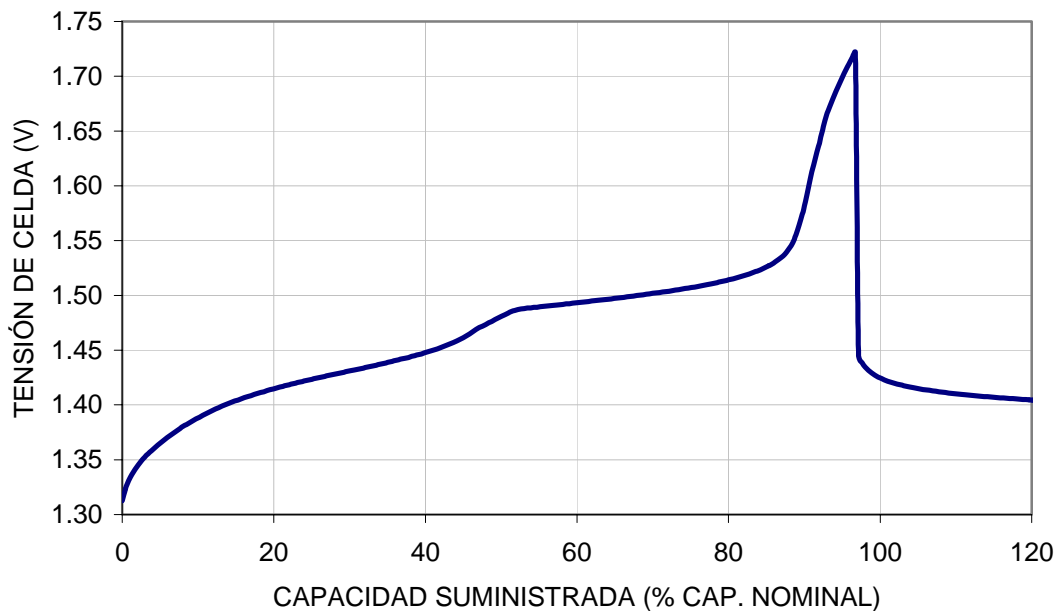


Figura 4-19. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.

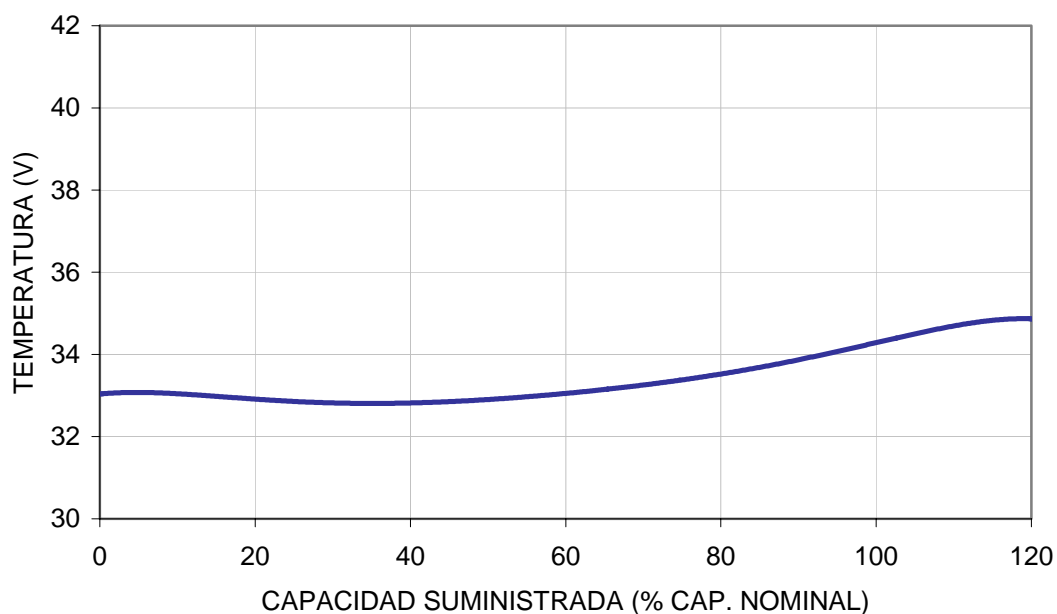


Figura 4-20. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 33 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	114
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	96,7
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	93,2
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,3
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	81,4
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	2

Tabla 4-6. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.

4.2.2.1.3 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 0,5C

El comportamiento a 15 °C de una batería de Ni-Cd durante la carga a razón de 0,5C comienza a mostrar una pequeña disminución de los índices de comportamiento utilizados para evaluar su respuesta ante el proceso de carga.

La figura 4-21 muestra la tensión de celda de la batería funcionando a 15 °C y razón de carga de 0,5C. A medida que la temperatura es menor se observa un aumento de la tensión de celda durante la carga. Este aumento de la tensión enmascara en cierta medida, la visualización de la primera pendiente observada en las curvas de tensión de las figuras 4-8 y 4-19.

En este tipo de prueba se pudo observar que a diferencia de los casos anteriores, donde la carga de la batería a 0,5C se realiza a 23 °C y 33 °C, la temperatura comienza a aumentar desde el inicio del proceso de carga. Esto se debe fundamentalmente a que el calor producido debido a las pérdidas óhmicas anula el efecto de la naturaleza endotérmica de las reacciones de carga. Las pérdidas óhmicas aumentan debido al incremento de la resistencia interna de la batería, producto del aumento de la densidad del electrolito. La figura 4-22 muestra la evolución de la temperatura durante la carga de la batería.

La tabla 4-7 hace un resumen de las principales características del comportamiento promedio observado en las baterías de Ni-Cd durante la carga a razón de 0,5C y a temperatura ambiente de 15 °C. Como se puede observar, se produce un aumento en la temperatura al final de la carga (3,5 °C), superior al observado a 23 °C y 33 °C. Este aumento de la temperatura coincide con la disminución de la eficiencia energética hasta aproximadamente el 81 por ciento. La aceptación de carga se mantuvo alta (por encima del 97 por ciento) ya que no se sometió la batería a sobrecarga después de la producción de hidrógeno.

A pesar de los inconvenientes observados, se puede decir que el comportamiento de la batería bajo esta razón de carga y temperatura de 15 °C es aceptable.

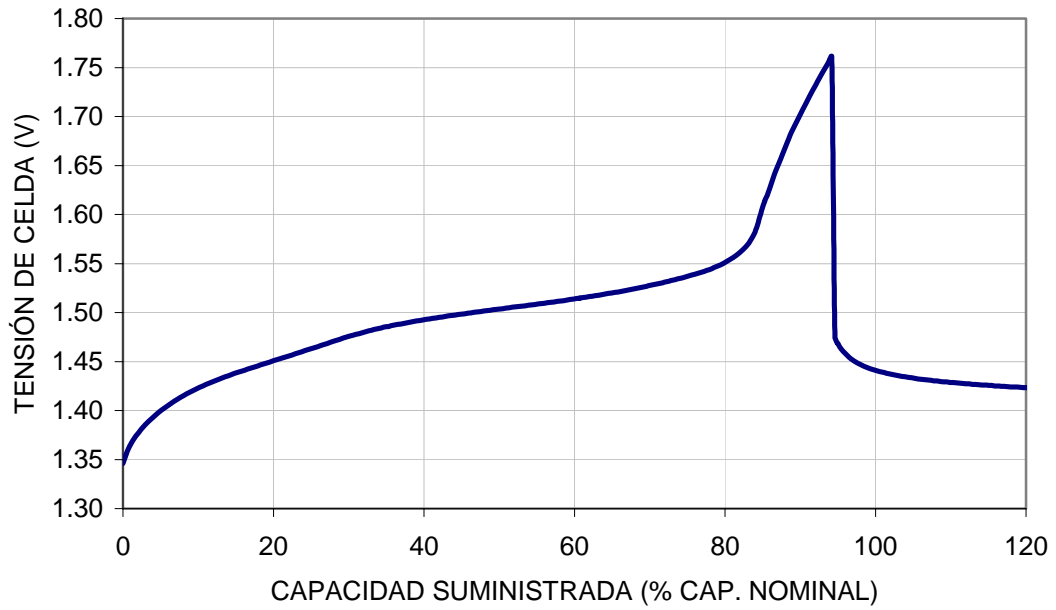


Figura 4-21. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C.

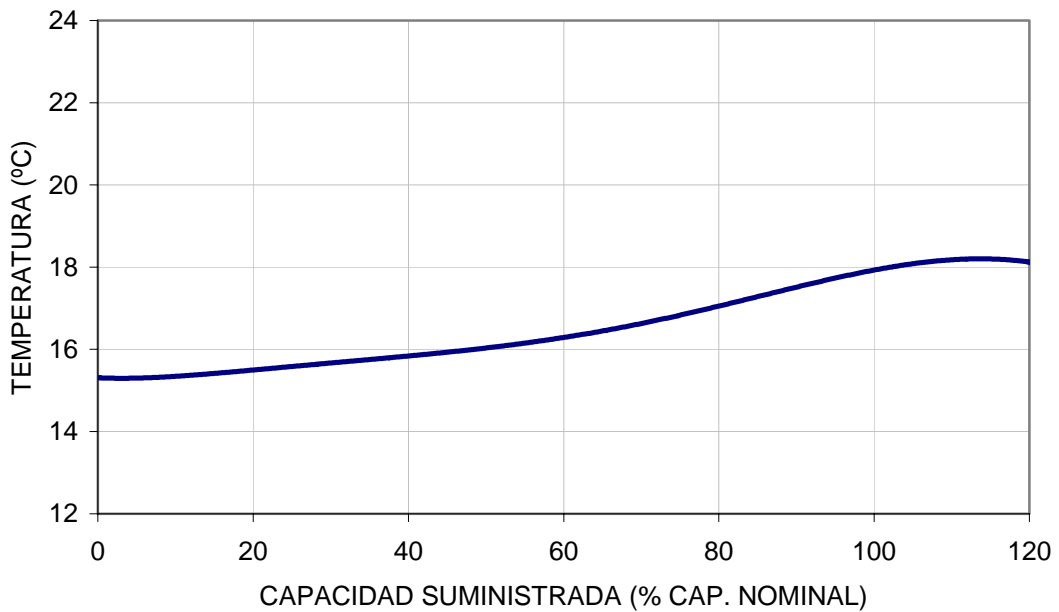


Figura 4-22. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 15 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	111
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	94,2
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	92
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,6
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	81
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	3,5

Tabla 4-7. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd.
Razón de carga de 0,5C y temperatura de 15 °C.

4.2.2.1.4 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 0,5C

El análisis del funcionamiento a temperatura ambiente de 5 °C puede resultar interesante ya que es una temperatura baja con respecto a la temperatura óptima de funcionamiento de 23 °C. No obstante, es una temperatura donde con gran probabilidad se necesita ejecutar una carga rápida en una aplicación cualquiera. A medida que la temperatura baja, el electrolito de las baterías se va haciendo cada vez más denso, dificultándose la transferencia iónica y aumentado cada vez más la resistencia interna de la batería.

En la figura 4-23 se puede observar la evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando se le aplica una razón de carga de 0,5C a una temperatura de 5 °C. La tensión de celda en estas condiciones de temperatura es superior a la observada en las curvas de tensión de celda a temperaturas más altas. También en este caso, queda enmascarada la primera pendiente de la curva de tensión.

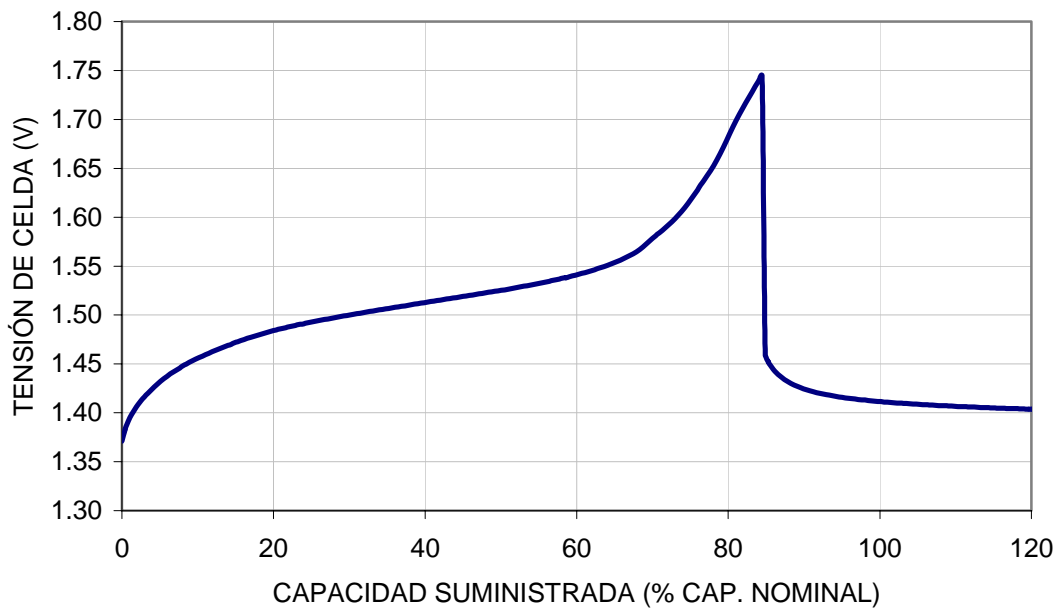


Figura 4-23. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C.

El aumento de la temperatura, con respecto a la temperatura de inicio de la carga de (5 °C), fue de aproximadamente 4 °C. Este aumento de temperatura está dentro del valor esperado cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C, no obstante se observó un ligero incremento con respecto a las pruebas realizadas a 15 °C de temperatura. Este incremento está asociado fundamentalmente, con el incremento de la resistencia interna de la batería. La figura 4-24 muestra la evolución típica de la temperatura de la batería cuando ésta se carga a 5 °C. Tampoco en este caso se observa una disminución inicial de la temperatura como se observó cuando la temperatura de funcionamiento se estableció en 23 °C o 33 °C.

El problema fundamental de la realización de la carga en estas condiciones (0,5C y 5 °C) está relacionado con una drástica reducción de la capacidad que puede ser descargada de la batería y que está relacionado a su vez con la poca cantidad de capacidad que la batería puede aceptar de forma eficiente durante la carga. A pesar de que la aceptación de carga se mantuvo por encima del 98 por ciento, solo un 84,4 por ciento de capacidad pudo ser suministrada a la batería antes de que se

detectara hidrógeno y por tanto detenido el proceso de carga. De esta forma, solo se pudo descargar de la batería un 83 por ciento de la capacidad nominal.

En la tabla 4-8 se pueden observar algunas de las características más importantes durante la carga a 0,5C y temperatura de 5 °C. La eficiencia energética continúa descendiendo respecto al valor alcanzado cuando la temperatura del medio fue de 23 °C, pero de forma muy ligera (menos de un 2 por ciento de la eficiencia energética a 23 °C y razón de 0,5C).

Evidentemente, el funcionamiento en carga a temperaturas bajas de las baterías de Ni-Cd es peor que a temperaturas más altas y debe tenerse en cuenta en el diseño de cargadores rápidos.

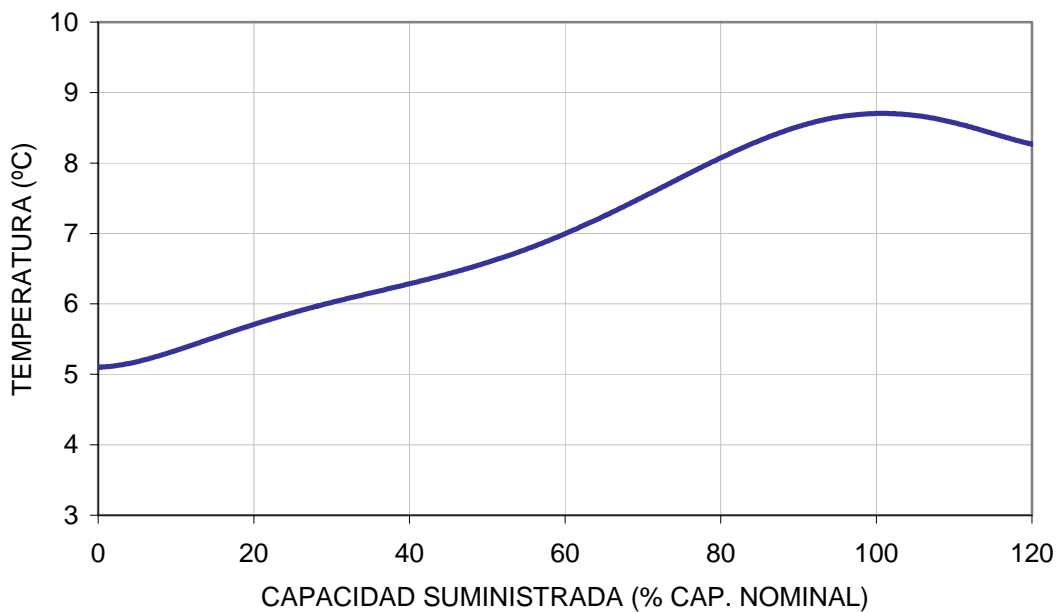


Figura 4-24. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 5 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	99,5
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	84,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	83
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	98,3
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	79,8
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	4

Tabla 4-8. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 0,5C y temperatura de 5 °C.

4.2.2.1.5 Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 0,5C y diferentes temperaturas.

Para concluir acerca del comportamiento de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 0,5C y en diferentes condiciones de temperatura se muestran las gráficas de las figuras 4-25, 4-26, 4-27, 4-28 y 4-29.

En la figura 4-25 se presentan las curvas características de tensión de celda observadas durante la carga a 0,5C y diferentes temperaturas de funcionamiento. Cuando la batería funciona a 23 °C y 33 °C la evolución de las curvas de tensión coincide prácticamente hasta el final de la carga. No obstante, es destacable la forma prematura en que aparece la primera pendiente en la curva de tensión cuando la carga se realiza a 33 °C.

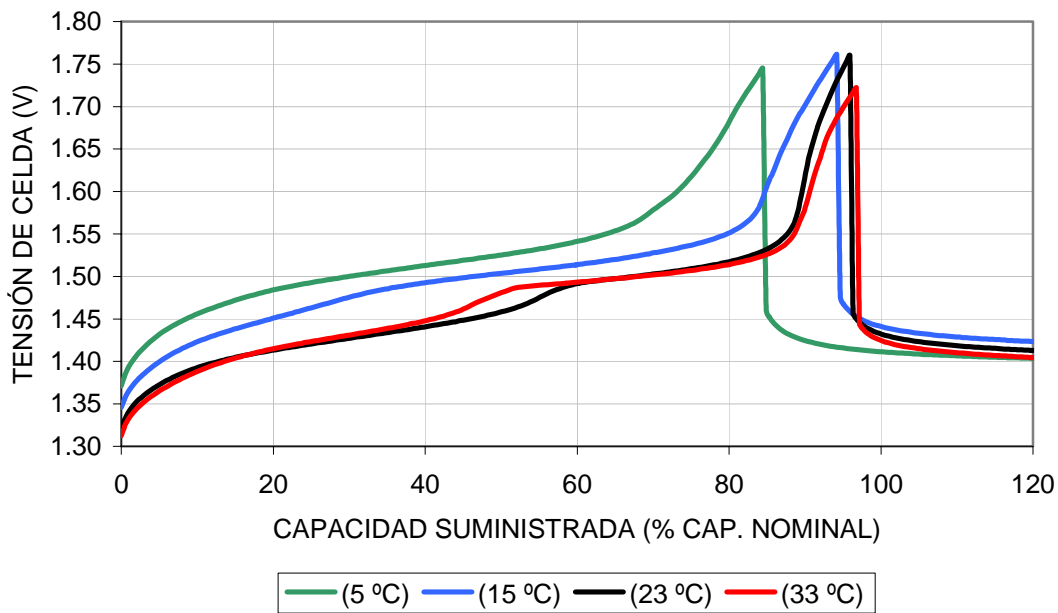


Figura 4-25. Evolución de la tensión de celda en baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 0,5C y diferentes condiciones de temperatura.

La tensión de celda desde el inicio de la carga, es más alta a bajas temperaturas. Cuando se ha suministrado aproximadamente un 50 por ciento de la capacidad nominal a 5 °C, la tensión de celda supera en 70 mV aproximadamente al valor de la tensión cuando la temperatura se establece en 23°C.

En la figura 4-26 se puede ver como a 5 °C de temperatura la capacidad que puede ser extraída de la batería es un 10 por ciento más baja que la capacidad que puede ser descargada bajo las mismas condiciones de carga-descarga pero a 23 °C. Para temperaturas más altas el comportamiento es bastante bueno y la capacidad que puede ser extraída de la batería se enmarca entre el 92 y el 94 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

La aceptación de carga, como en todos los casos anteriores ha sido bastante alta producto de que se ha evitado el funcionamiento en zona de sobrecarga y solo se aprovecha la zona más eficiente de la carga en cada caso. La figura 4-27 muestra la aceptación de carga para cada temperatura de funcionamiento. En todos los casos la aceptación de carga se situó por encima del 96 por ciento.

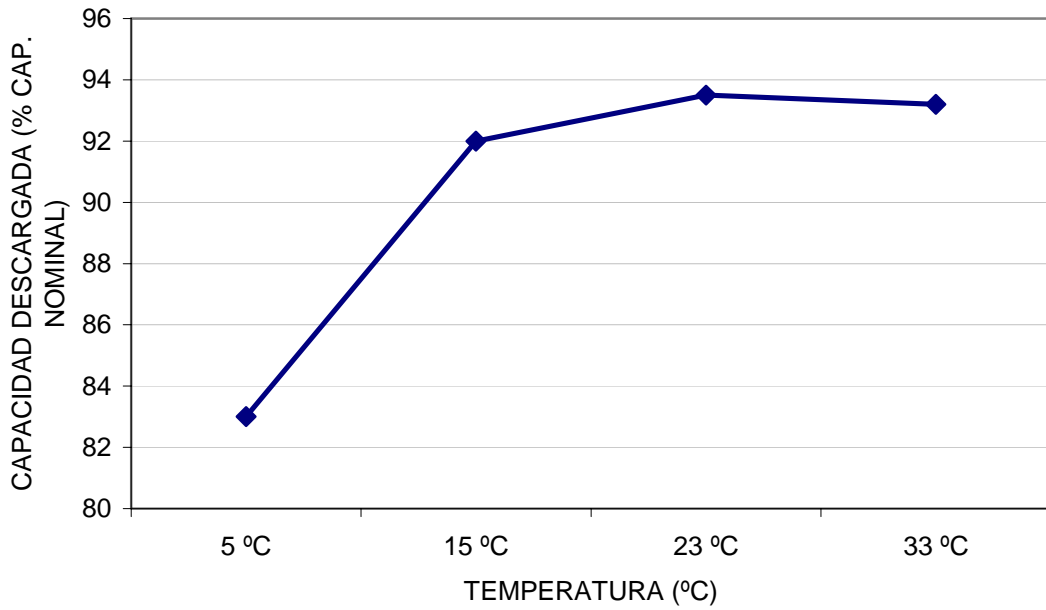


Figura 4-26. Capacidad descargada de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 0,5C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

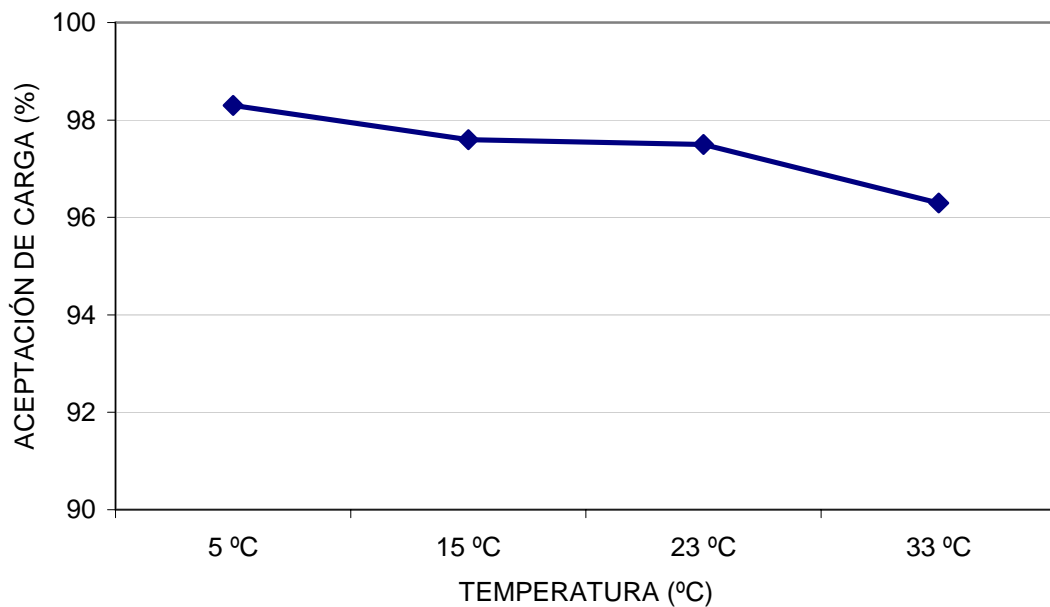


Figura 4-27. Aceptación de carga de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 0,5C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

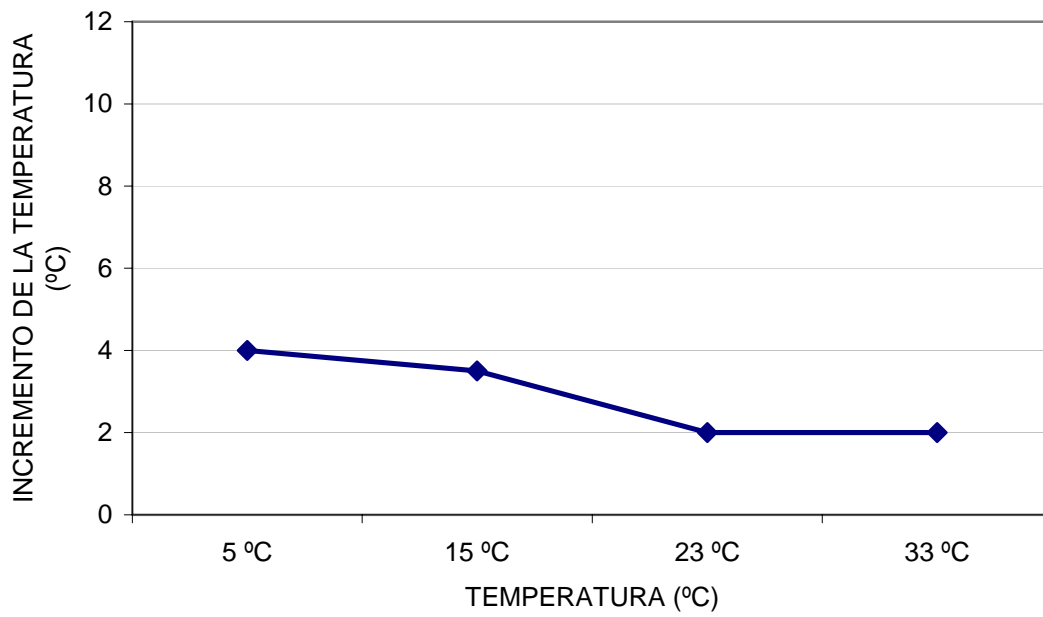


Figura 4-28. Incremento sobre la temperatura ambiente que se produce en cada caso cuando se carga una batería de Ni-Cd a 0,5C.

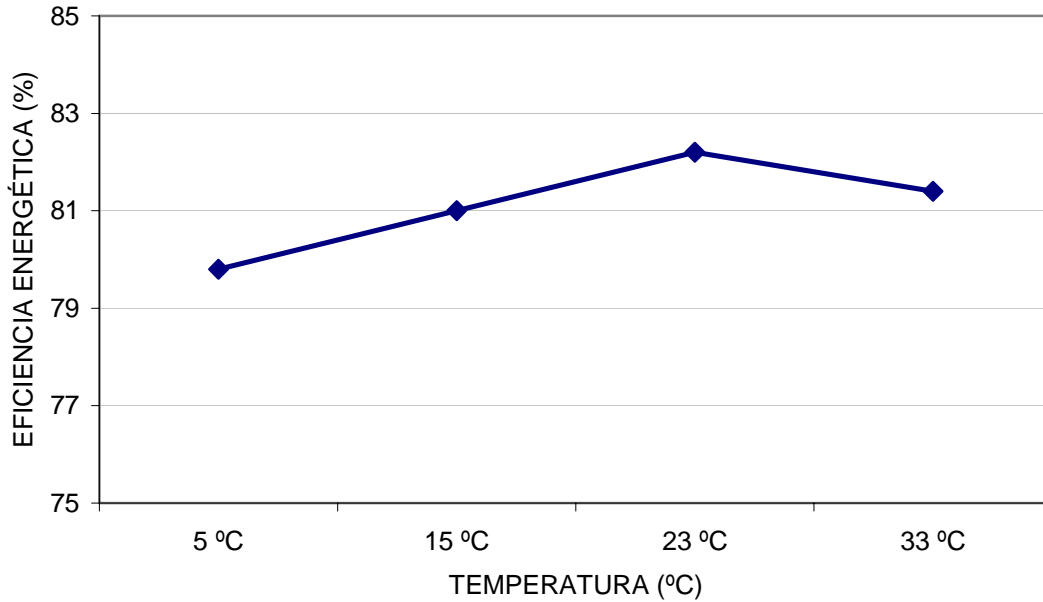


Figura 4-29. Eficiencia energética cuando se carga una batería de Ni-Cd a 0,5C y en diferentes condiciones de temperatura.

Coincidiendo con los ligeros aumentos de la temperatura, producidos durante la carga a temperaturas ambiente bajas se puede constatar un decrecimiento de la eficiencia energética. De cualquier forma, esta disminución de la eficiencia energética no supera el 2 por ciento con respecto al obtenido a temperatura ambiente de 23 °C (ver figuras 4-28 y 4-29).

4.2.2.2 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 1,0C

4.2.2.2.1 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 1,0C

El análisis del comportamiento de la batería de Ni-Cd cuando funciona bajo una razón de carga de 1,0C y temperatura de 23 °C se realiza en el apartado 4.2.1.4. Este análisis sirve de base comparativa para analizar el comportamiento de la batería cuando se carga a 1,0C a diferentes temperaturas. La evolución de la tensión, de la temperatura y los principales índices de comportamiento se pueden observar en las figuras 4-10 y 4-11 y en la tabla resumen 4-4 de dicho apartado.

4.2.2.2.2 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 1,0C

La figura 4-30 muestra la evolución típica de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando se carga con una razón de 1,0C y a 33 °C de temperatura. A diferencia de la curva de tensión cuando la temperatura de funcionamiento fue de 23 °C, en este caso se observa la primera pendiente que caracteriza el inicio de reacciones secundarias, asociadas con la producción de oxígeno en el electrodo positivo.

El incremento de la temperatura sobre la temperatura ambiente de 33 °C se puede ver en la curva que sigue la evolución de este parámetro (ver figura 4-31). Aún cuando la razón de carga de 1,0C se aplica a una batería que funciona a una temperatura ambiente de 33 °C podemos apreciar que el aumento de temperatura producido es bajo (aproximadamente 3,5 °C) y por tanto no existe peligro de superar la temperatura límite de 45 °C.

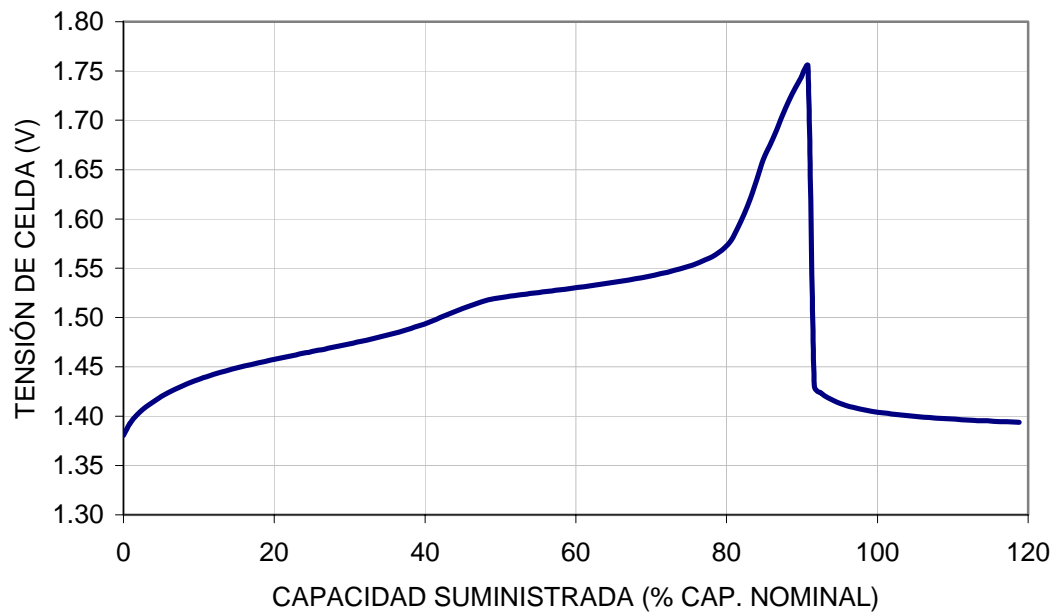


Figura 4-30. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 33 °C.

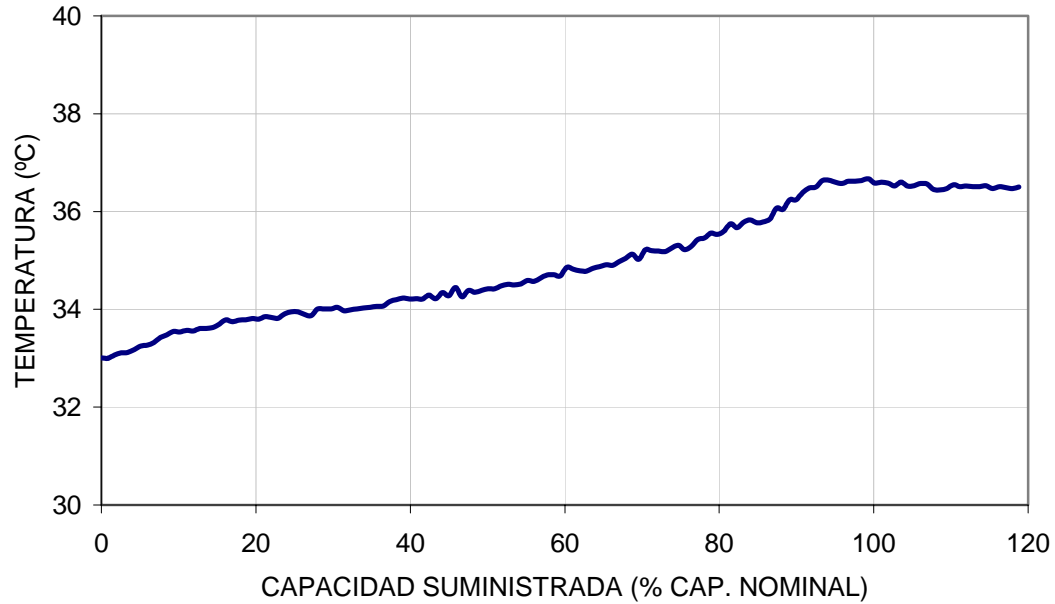


Figura 4-31. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 33 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 33 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	53,5
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	90,8
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	87,7
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,6
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	79,2
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	3,5

Tabla 4-9. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 33 °C.

No obstante, en el resumen de características mostrado en la tabla 4-9 se puede apreciar como la capacidad descargada de la batería una vez que ha sido cargada bajo estas condiciones, desciende por debajo del 90 por ciento.

4.2.2.2.3 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 1,0C

La curva de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 15 °C se muestra en la figura 4-32.

La temperatura durante la carga se incrementa aproximadamente 5 °C sobre la temperatura inicial de la batería al comienzo de la carga. La curva que muestra la evolución de la temperatura se puede apreciar en la figura 4-33. La temperatura de la batería se incrementa desde el inicio de la carga, anulando el efecto endotérmico de las reacciones de carga.

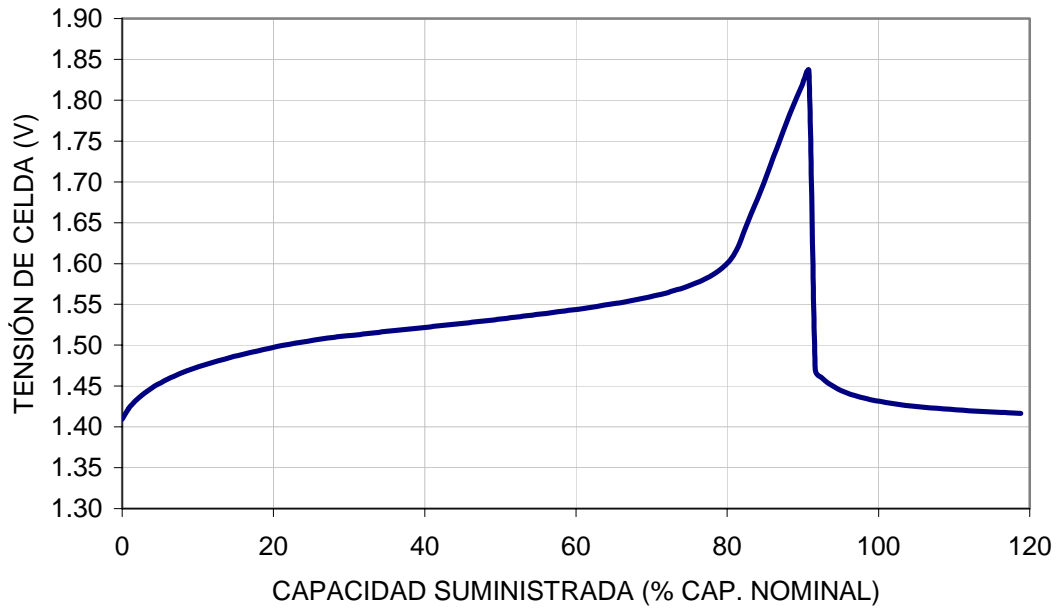


Figura 4-32. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

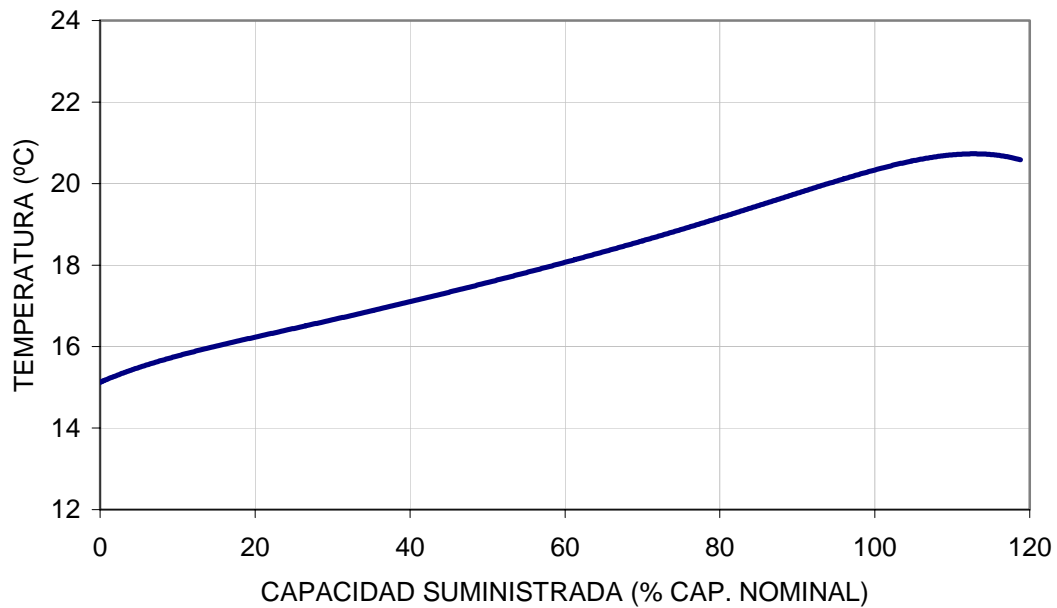


Figura 4-33. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

La capacidad que es posible descargar de la batería disminuye ligeramente con respecto a la capacidad que fue posible descargar cuando se realiza la carga utilizando una razón de 1,0C y a temperatura ambiente de 23 °C. Funcionando a temperatura ambiente de 15 °C, solo se pudo descargar el 88,8 por ciento de la capacidad nominal de la batería. La aceptación de carga se mantuvo bastante alta, lo que demuestra que la carga se realiza en la zona más eficiente. La eficiencia energética disminuyó menos de 1 por ciento con respecto a la obtenida cuando la carga se realizó a 23 °C (ver tabla 4-10).

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 15 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	53,5
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	90,8
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	88,8
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,8
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	78,6
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	5,0

Tabla 4-10. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd.
Razón de carga de 1,0C y temperatura de 15 °C.

4.2.2.2.4 *Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 1,0C*

La figura 4-34 muestra la curva típica de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd, cuando se carga a razón de 1,0C y a 5 °C de temperatura.

En estas condiciones de carga se observa, según los resultados obtenidos en el laboratorio, que la capacidad extraída de la batería durante su descarga puede aumentar cuando se carga la batería con una razón de 1,0C a baja temperatura (5

°C) con respecto, por ejemplo a una batería que se carga con una misma razón pero a 15 °C. Esto quiere decir, que la mejora que produce la aplicación de una razón de carga de 1,0C a 5 °C sobre una batería de Ni-Cd (en cuanto al porcentaje de capacidad que puede ser descargada con respecto a la capacidad nominal) es más significativa que cuando la carga se realiza a 15 °C. El aumento de la temperatura desde el propio comienzo de la carga permite que la temperatura del electrolito se incremente y disminuya la resistencia interna de la batería.

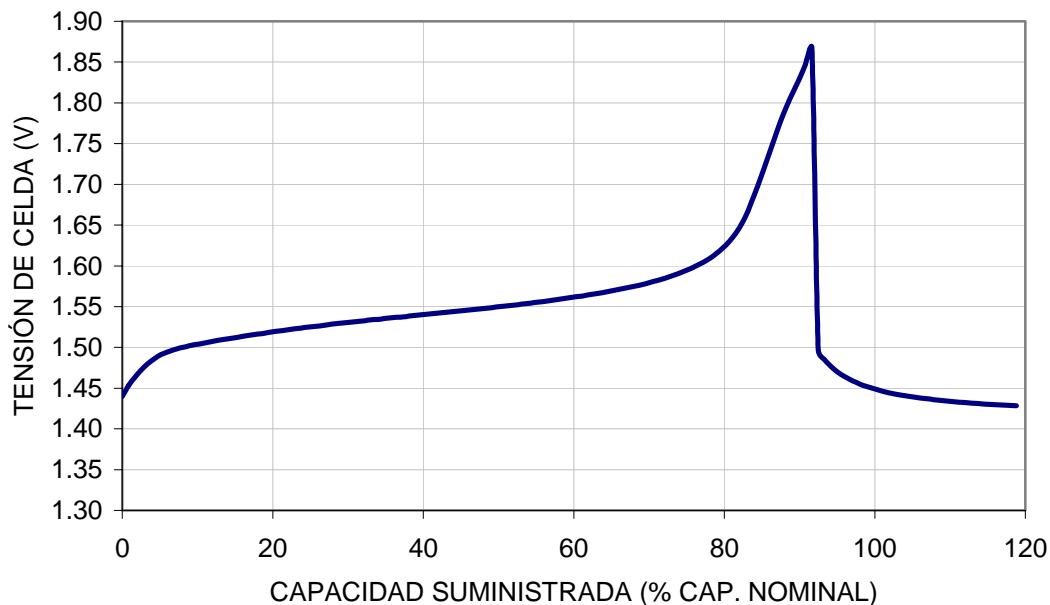


Figura 4-34. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 5 °C.

La figura 4-35 describe la evolución de la temperatura durante la carga de la batería con una razón de 1,0C y 5 °C de temperatura. El incremento registrado al final de la carga fue de aproximadamente 6 °C sobre la temperatura de funcionamiento. La eficiencia energética observada fue la menor obtenida para esta razón de carga (aproximadamente un 77 por ciento).

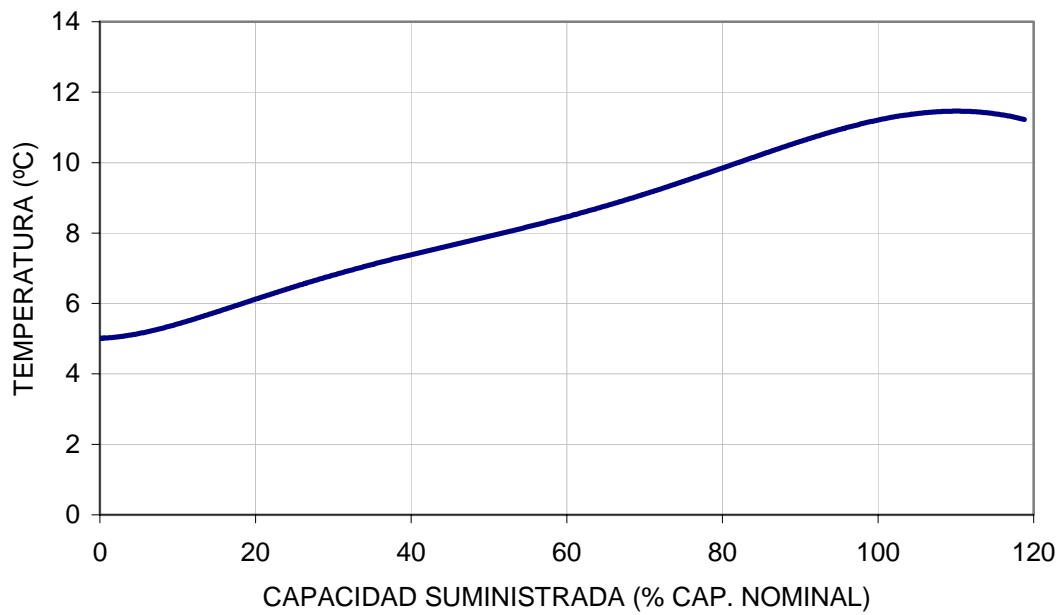


Figura 4-35. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 5 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 5 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	54
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	91,6
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	89,6
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,8
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	77,3
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	5,5

Tabla 4-11. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 1,0C y temperatura de 5 °C.

4.2.2.2.5 Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 1,0C y diferentes temperaturas.

La figura 4-36 muestra diferentes curvas de tensión de celda cuando la batería de Ni-Cd se carga a 1,0C y diferentes temperaturas. Como se puede apreciar, al utilizar una razón de carga de 1,0C, se reducen las diferencias entre la tensión de celdas a diferentes temperaturas, sobre todo a partir de que se ha suministrado entre 40 y un 50 por ciento de la capacidad nominal. Esto se debe, a que el calentamiento que se produce desde el comienzo de la carga hace disminuir la tensión de celda, fundamentalmente en los casos donde se funciona a bajas temperaturas.

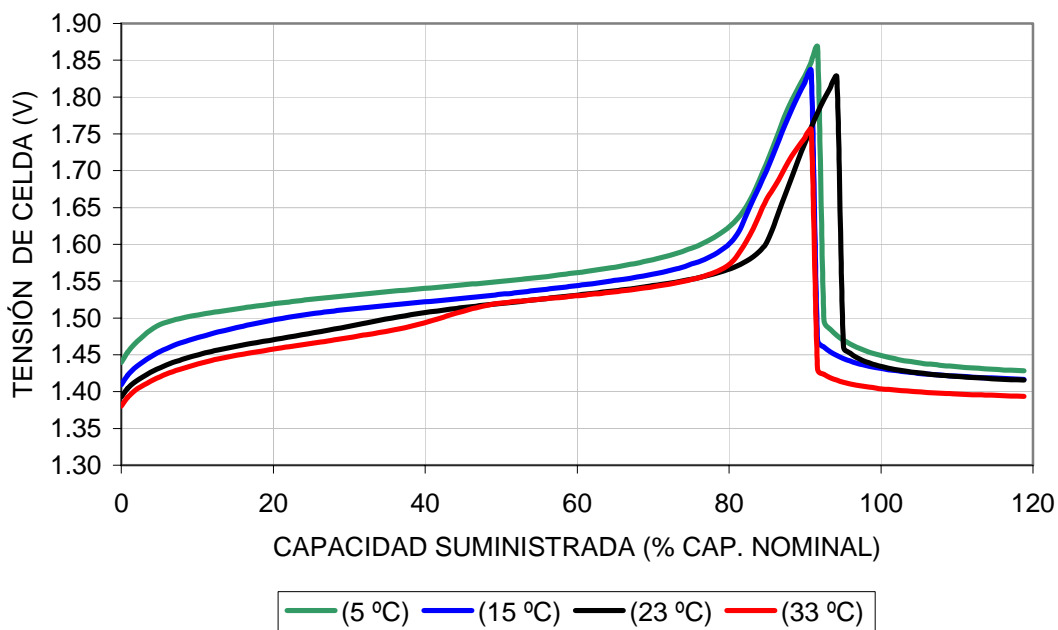


Figura 4-36. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando funciona con una razón de carga de 1,0C y diferentes condiciones de temperatura.

En la figura 4-37 se puede apreciar que no existen grandes diferencias en la capacidad que puede ser descargada de la batería cuando ésta se carga a 1,0C y diferentes temperaturas. La capacidad descargada a temperaturas bajas (5 °C), es mayor que cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C.

Después de realizar el análisis de las características observadas durante la carga de las baterías de Ni-Cd con una razón de 1,0C y diferentes temperaturas, se puede concluir que el comportamiento es aceptable y que una razón de carga de 1,0C mejora el comportamiento de la batería a temperaturas bajas. Los principales índices de comportamiento de la batería cuando se carga a 1,0C y diferentes temperaturas se pueden ver de forma comparativa en las gráficas de las figuras 4-37, 4-38, 4-39 y 4-40.

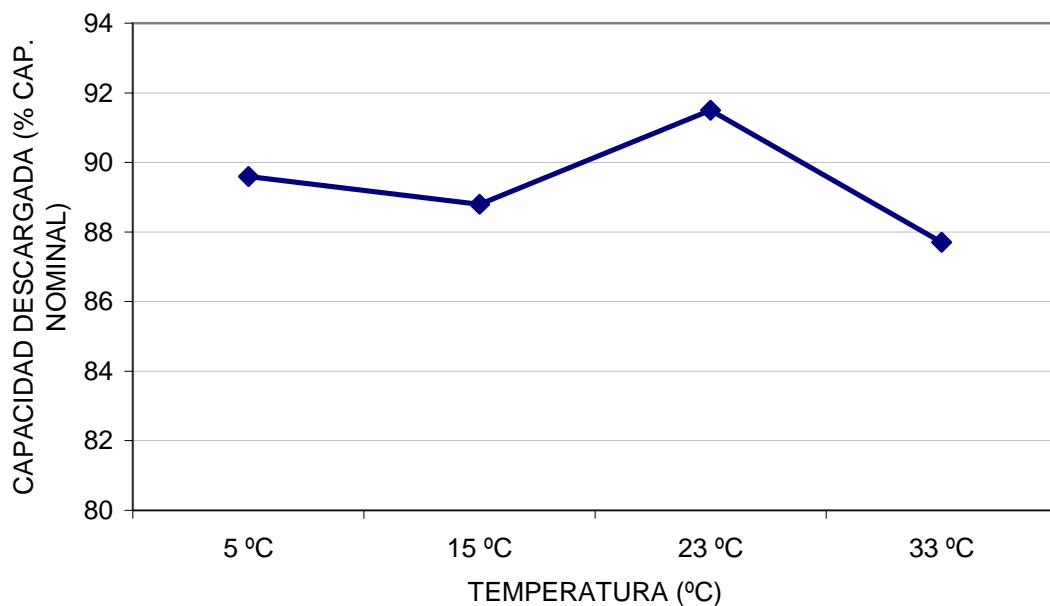


Figura 4-37. Capacidad descargada de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 1,0C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

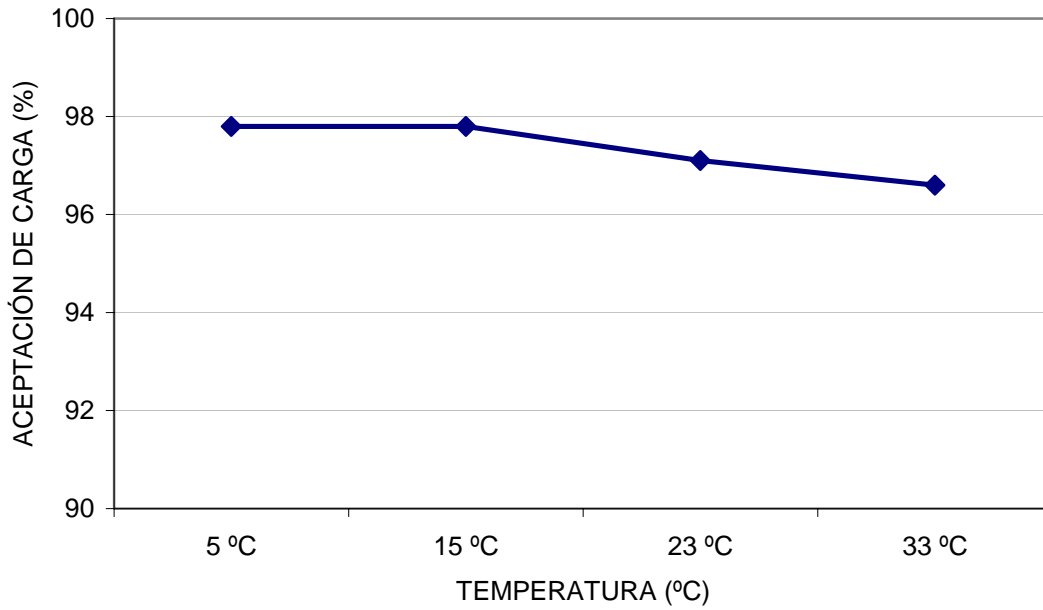


Figura 4-38. Aceptación de carga de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 1,0C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

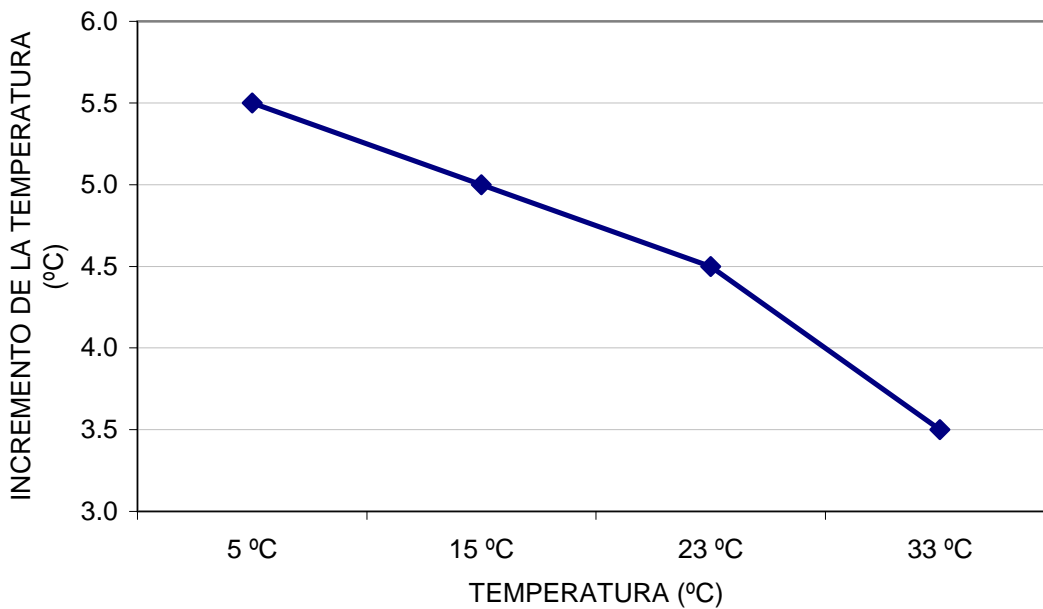


Figura 4-39. Incremento sobre la temperatura ambiente que se produce cuando se carga una batería de Ni-Cd a 1,0C.

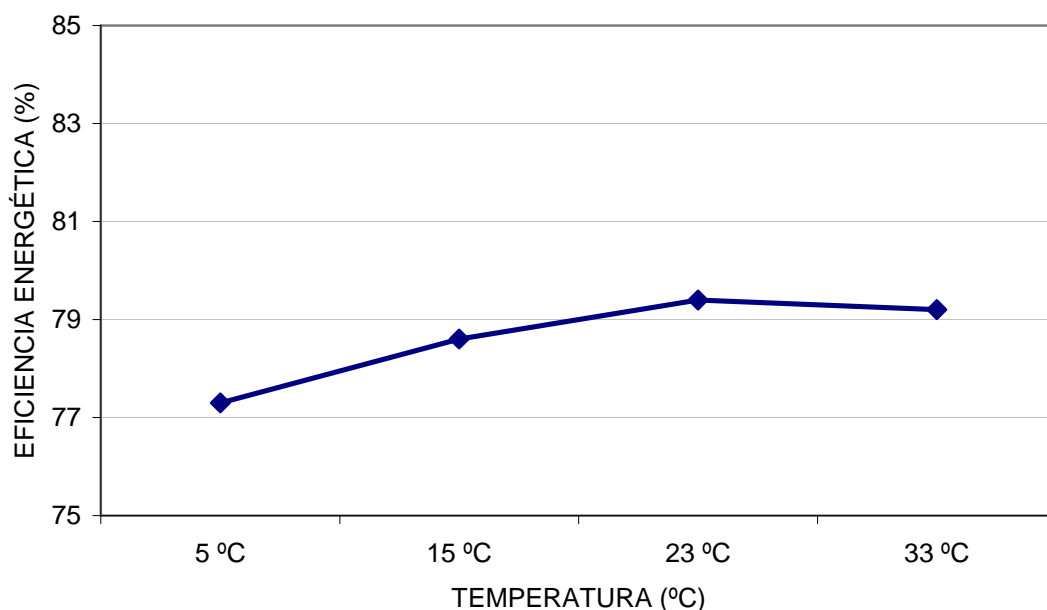


Figura 4-40. Eficiencia energética cuando se carga una batería de Ni-Cd a 1,0C y en diferentes condiciones de temperatura.

4.2.2.3 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 2,0C

4.2.2.3.1 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 23 °C y con una razón de carga de 2,0C

El comportamiento de la batería cuando se le aplica una razón de carga de 2,0C bajo una temperatura ambiente de 23 °C ha sido analizado en el apartado 4.2.1.5. La evolución de la tensión, de la temperatura y los principales índices de comportamiento se pueden observar en las figuras 4-12 y 4-13 y en la tabla resumen 4-5 de dicho apartado.

En los apartados siguientes se detallará el comportamiento de la batería cuando se carga con una razón de 2,0C y diferentes temperaturas de trabajo.

4.2.2.3.2 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 33 °C y con una razón de carga de 2,0C

La figura 4-41 muestra la evolución de la tensión celda de una batería de Ni-Cd cuando se carga a razón de 2,0C y temperatura ambiente de 33 °C. Como se puede apreciar al inicio de la curva de tensión se produce una deformación producto de la elevada sobretensión a que se somete la batería con esta razón de carga. La evolución de la temperatura y la tabla resumen se observan en la figura 4-42 y 4-12.

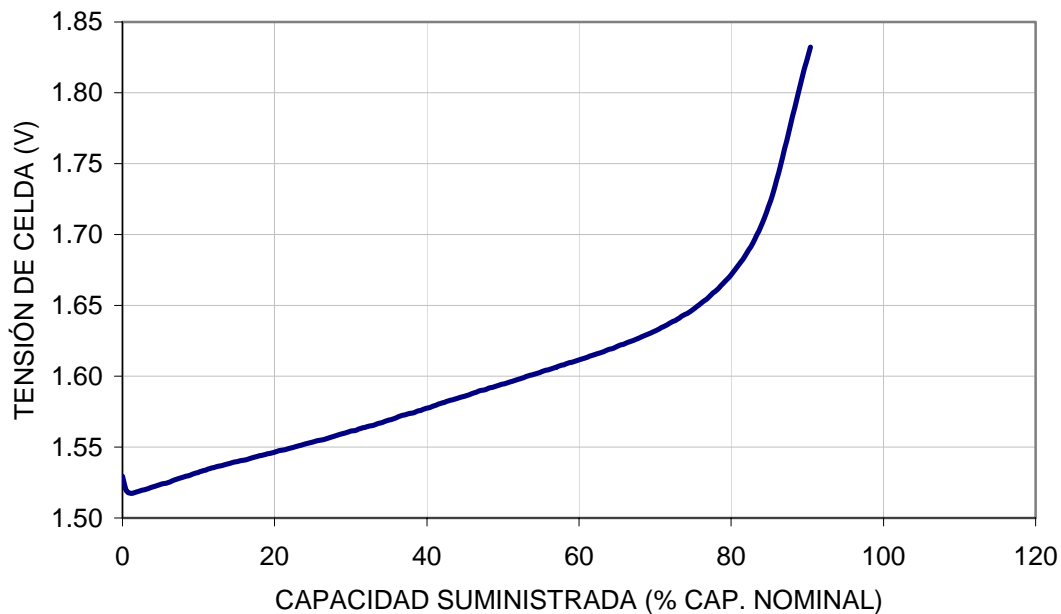


Figura 4-41. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 2,0C y temperatura ambiente de 33 °C.

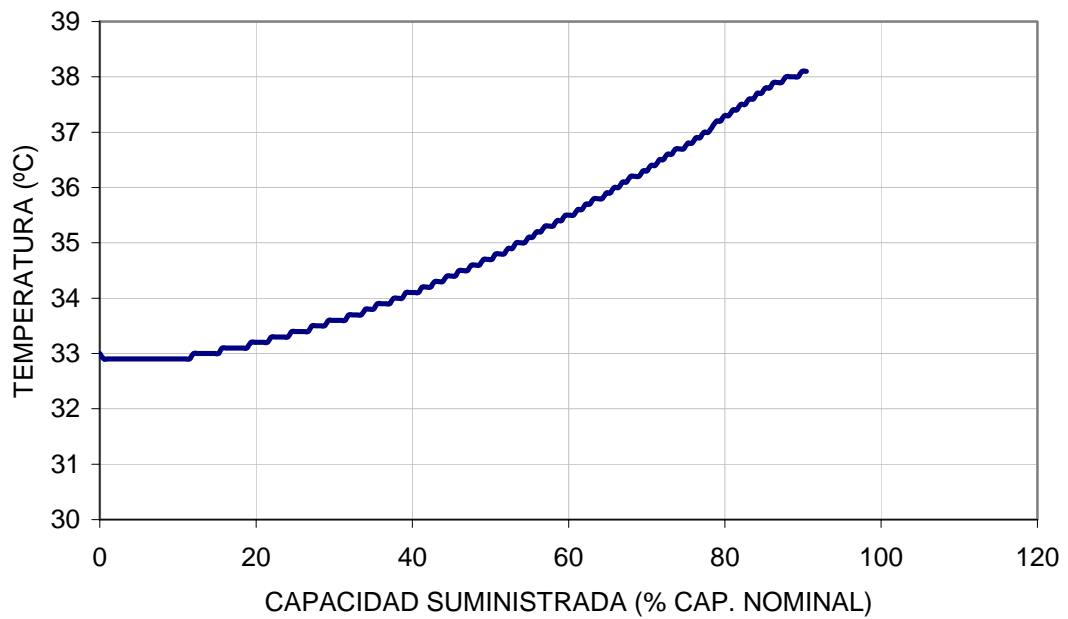


Figura 4-42. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 2,0C y temperatura ambiente de 33 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 2,0C Y TEMPERATURA DE 33 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	27,0
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	90,7
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	85,5
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	94,3
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	73,0
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	5,0

Tabla 4-12. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 2,0C y temperatura de 33 °C.

4.2.2.3.3 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 15 °C y con una razón de carga de 2,0C

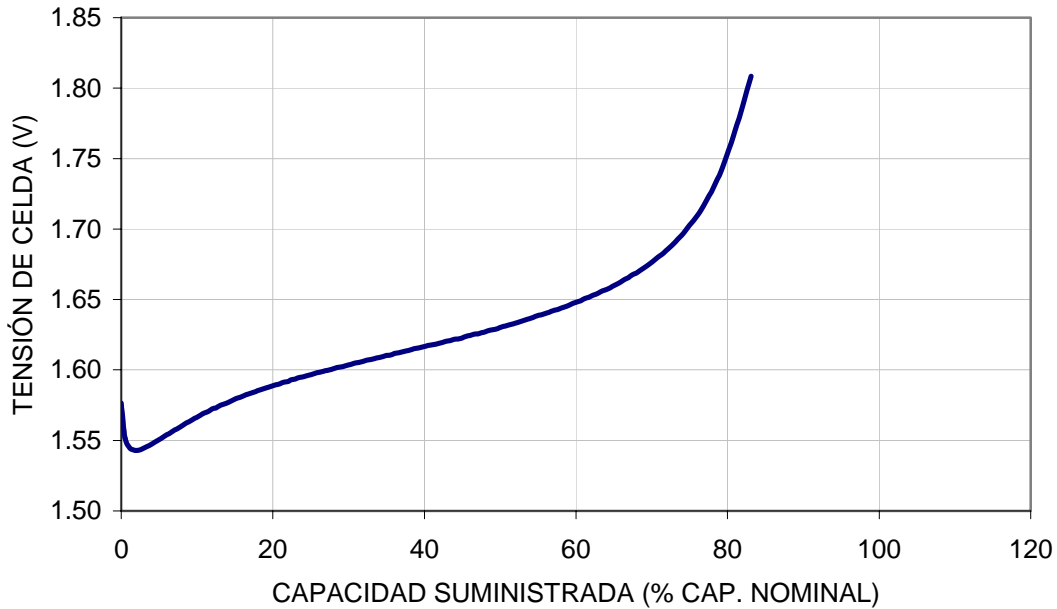


Figura 4-43. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 2,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

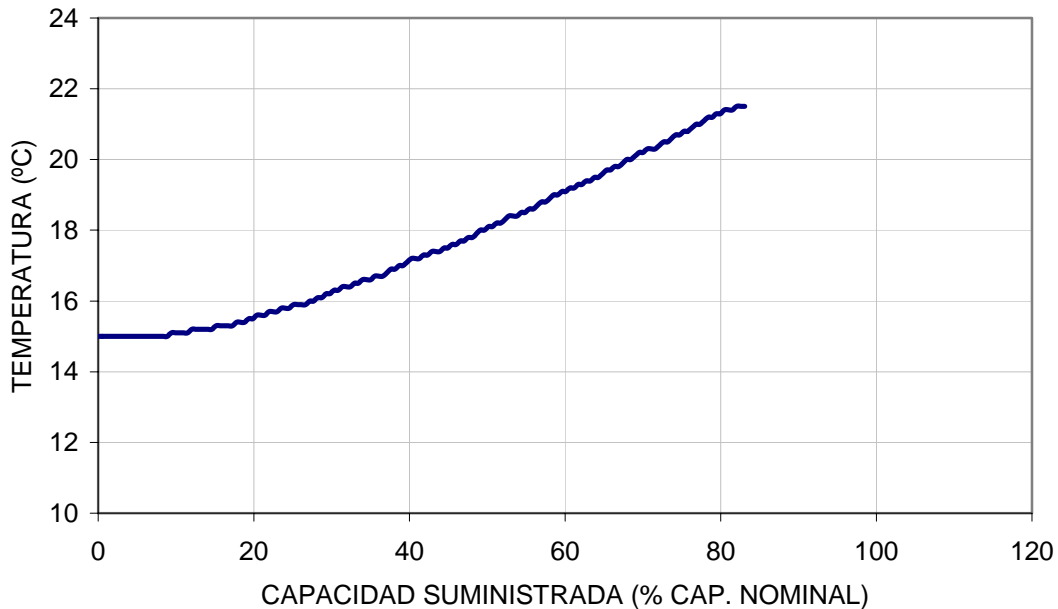


Figura 4-44. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 2,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 2,0C Y TEMPERATURA DE 15 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	24
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	82,8
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	82,3
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	99,4
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	76,0
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	7,0

Tabla 4-13. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 2,0C y temperatura de 15 °C.

4.2.2.3.4 Evolución de la tensión y la temperatura de baterías de Ni-Cd funcionando a temperatura ambiente de 5 °C y con una razón de carga de 2,0C

La temperatura ambiente de 5 °C no favorece a la utilización de carga rápida. Como ya se ha mencionado, a temperaturas bajas el electrolito se hace cada vez más denso y se dificulta el camino para la transferencia iónica, en definitiva se produce un aumento considerable de la resistencia interna de la batería. Este aumento de la resistencia interna está relacionado directamente con el incremento de las pérdidas por efecto Joule y por tanto una menor eficiencia del proceso de carga.

La figura 4-45 muestra la curva de tensión de celda cuando la batería se carga con la razón de 2,0C y temperatura de 5 °C. En esta figura se puede apreciar que la sobretensión al inicio de la carga es mucho mayor que la producida cuando se aplica esta razón de carga para temperaturas de funcionamiento más altas.

La evolución de la temperatura se puede ver en la figura 4-46. El incremento de temperatura en este caso es el más alto observado cuando se utiliza esta razón de carga (10 °C). El resto de índices de comportamiento se muestran en la tabla 4-14.

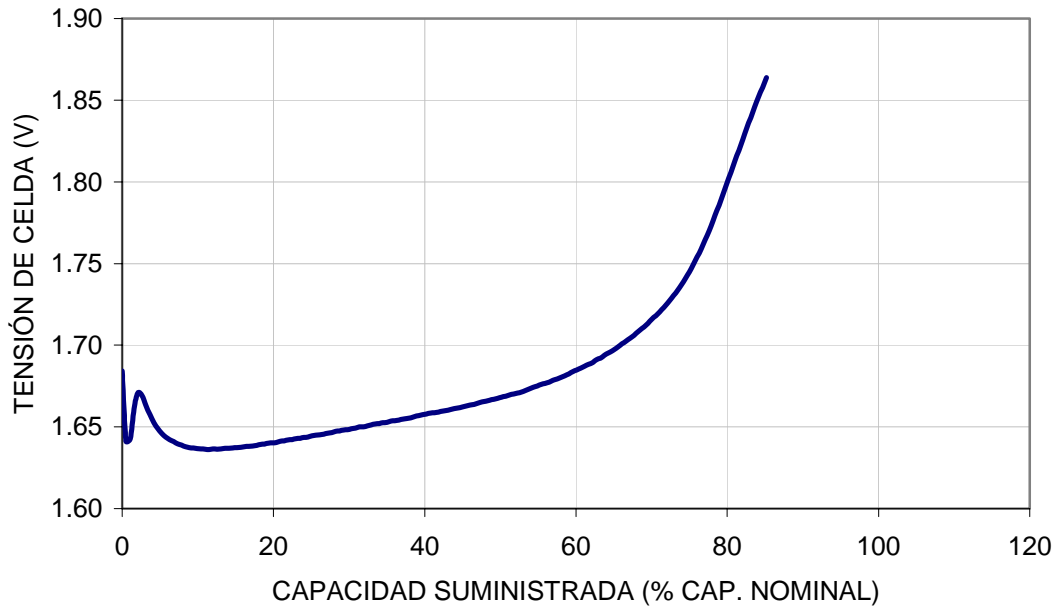


Figura 4-45. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 2,0C y temperatura ambiente de 5 °C.

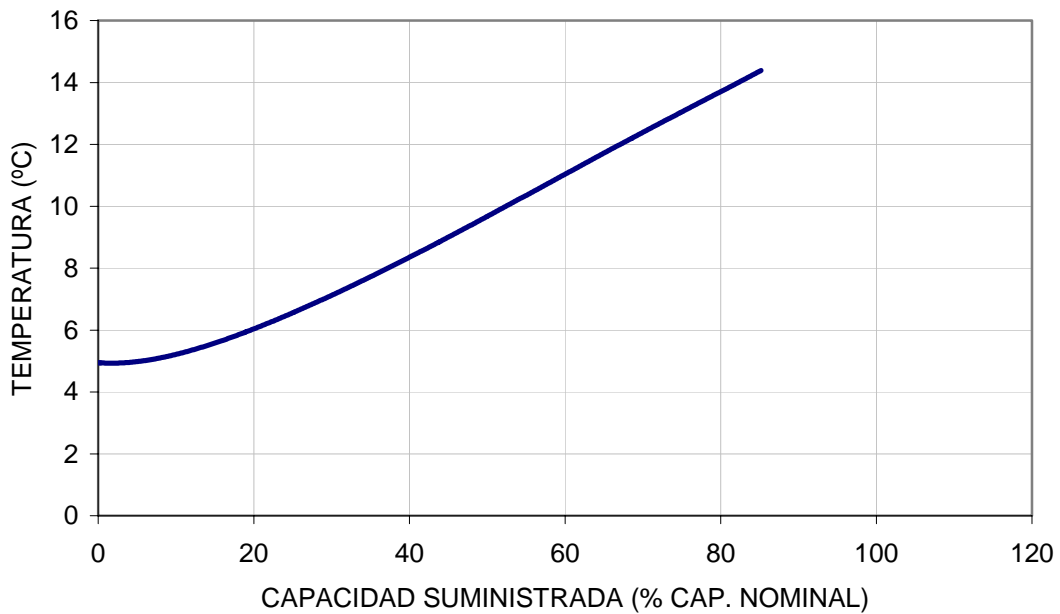


Figura 4-46. Evolución de la temperatura durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 2,0C y temperatura ambiente de 5 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 2,0C Y TEMPERATURA DE 5 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	25,0
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	85,0
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	79,6
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	93,6
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	69,2
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	10,0

Tabla 4-14. Resumen de las características de funcionamiento de baterías de Ni-Cd. Razón de carga de 2,0C y temperatura de 5 °C.

4.2.2.3.5 Conclusiones acerca del comportamiento en carga de las baterías de Ni-Cd cuando funcionan con una razón de carga de 2,0C y diferentes temperaturas.

En la figura 4-47 se pueden observar de forma comparativa la evolución de las tensiones de celda cuando la batería de Ni-Cd se carga a diferentes temperaturas utilizando una razón de carga de 2,0C. Como se puede observar la sobretensión que se produce al inicio de la carga cuando la temperatura de funcionamiento es de 5 °C, supera en más de 100 mV/celda a la tensión inicial de carga cuando la temperatura de funcionamiento es superior. El rendimiento a esta temperatura es bajo y se puede observar las figuras 4-48, 4-49, 4-50 y 4-51. Para ellos se han utilizado los principales índices de comportamiento en carga.

La razón de carga de 2,0C no debe utilizarse cuando la temperatura ambiente durante la carga es baja (por debajo de 15 °C). De cualquier forma la capacidad que se puede descargar de la batería cuando se emplea esta razón de carga es muy baja, por lo que su utilización no es recomendable a menos que sea necesario.

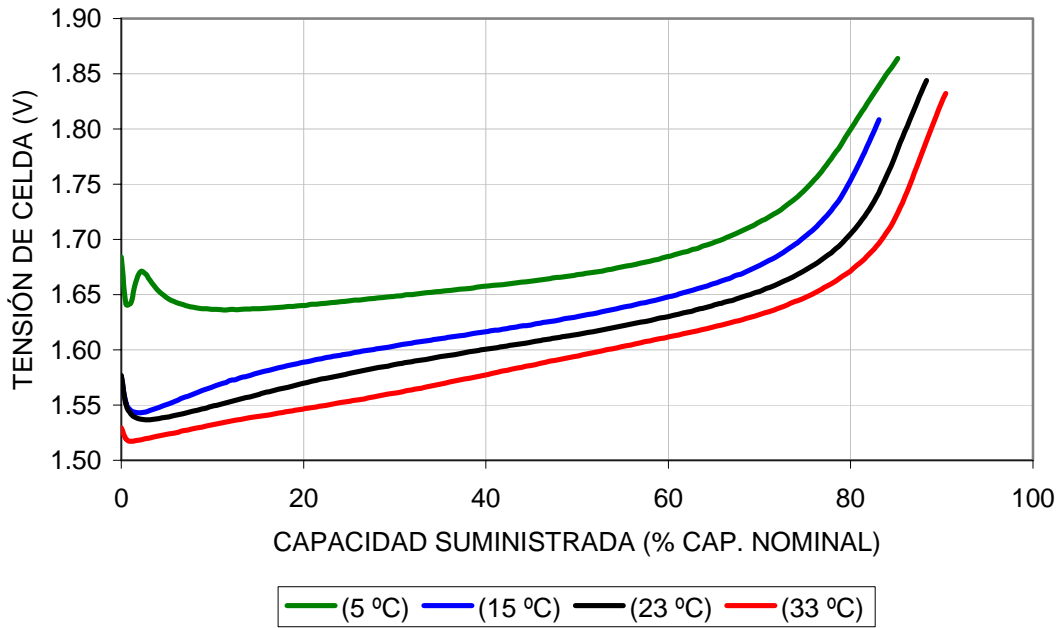


Figura 4-47. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando funciona con una razón de carga de 2,0C y diferentes condiciones de temperatura.

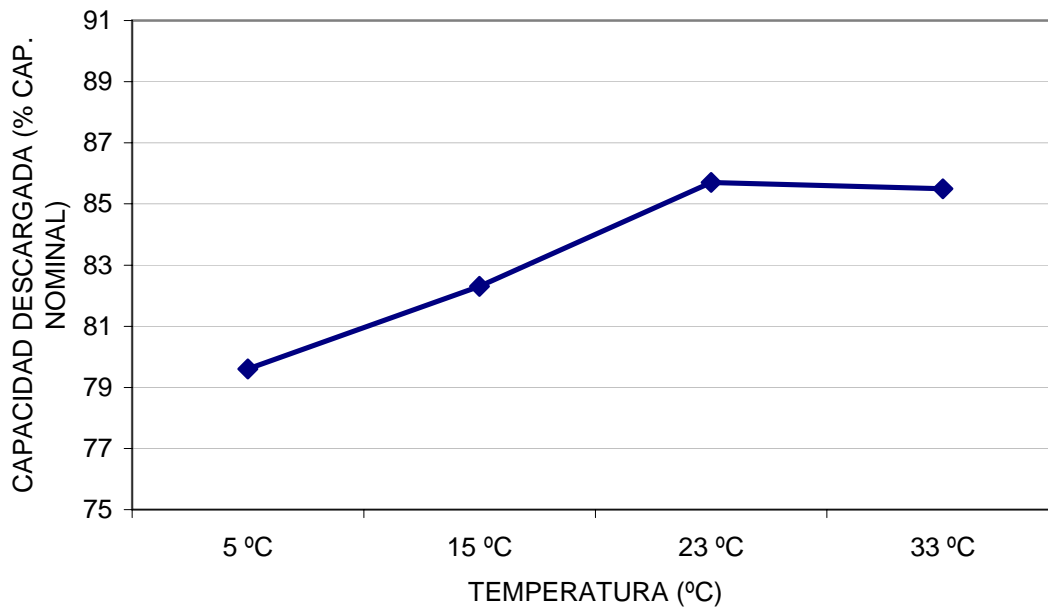


Figura 4-48. Capacidad descargada de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 2,0C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

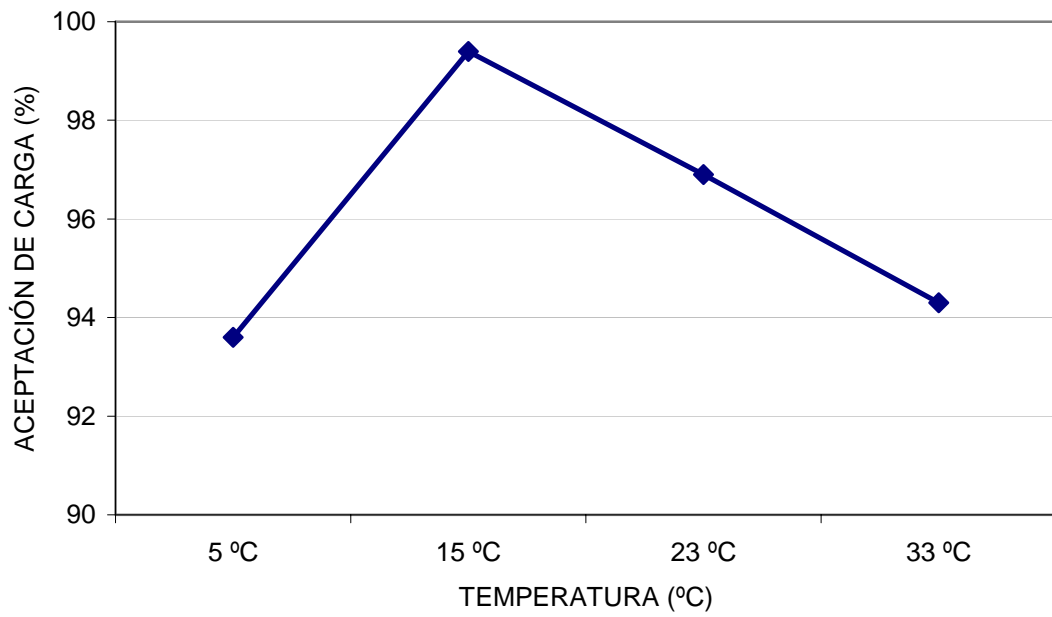


Figura 4-49. Aceptación de carga de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 2,0C bajo diferentes temperaturas de funcionamiento.

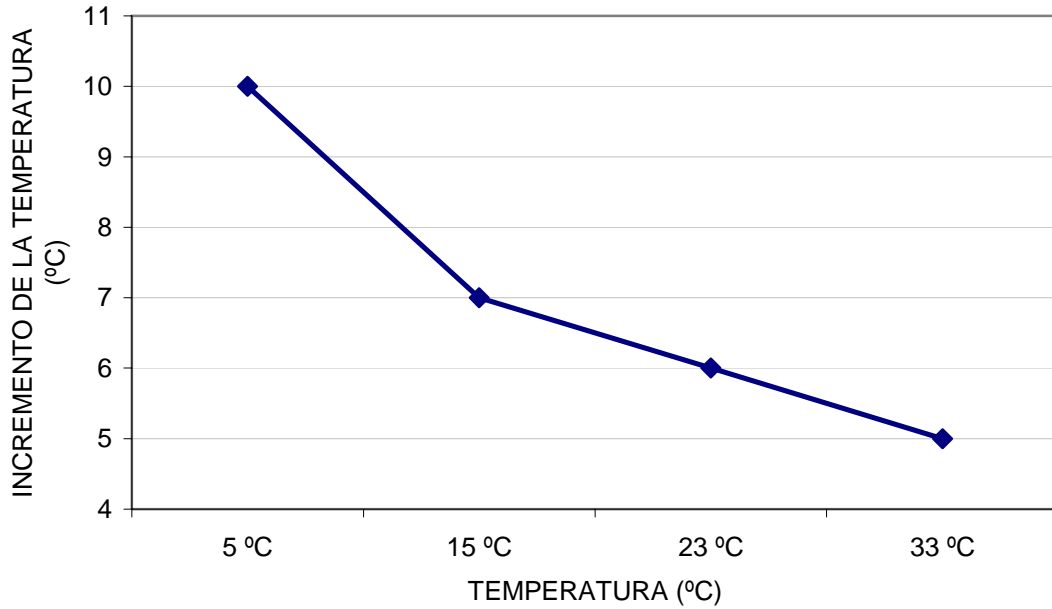


Figura 4-50. Incremento sobre la temperatura ambiente que se produce cuando se carga una batería de Ni-Cd a 2,0C.

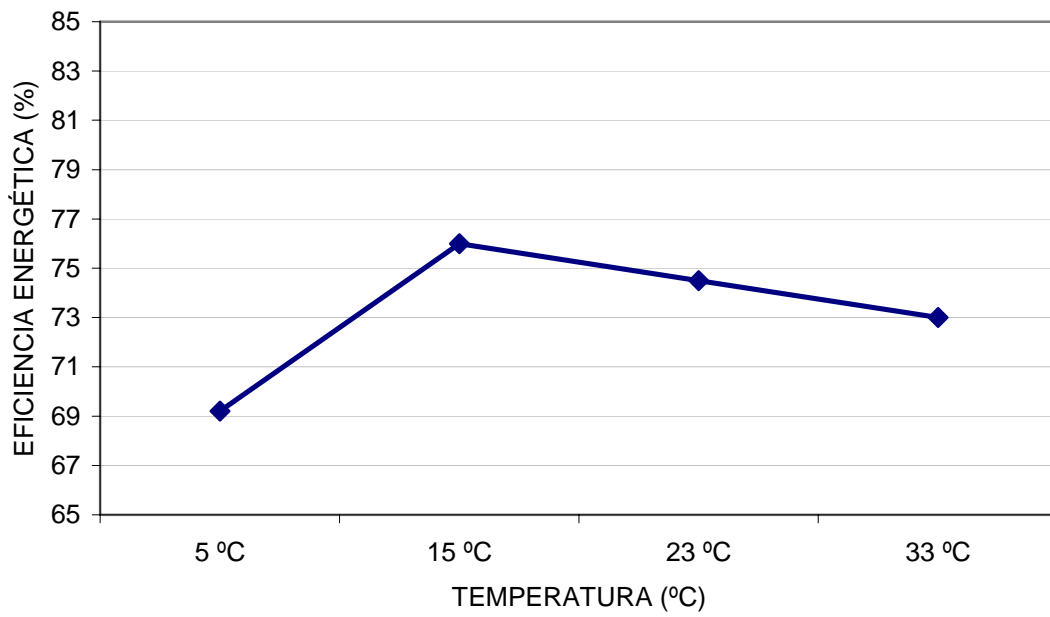


Figura 4-51. Eficiencia energética cuando se carga una batería de Ni-Cd a 2,0C y diferentes temperaturas.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA EN LA TECNOLOGÍA DE Ni-MH

Las baterías de Ni-MH se están utilizando cada vez más en sistemas de potencia donde se requieren ciclos repetidos de carga-descarga. Estas baterías presentan ciertas ventajas sobre las baterías de Ni-Cd como se comenta en el capítulo 1, pero el comportamiento de su respuesta bajo razones de carga elevadas es una prueba pendiente para esta tecnología de batería.

Existe poca información sobre el comportamiento en carga rápida de las diferentes tecnologías de baterías que se utilizan en sistemas de potencia y, en este caso, la falta de información es aún mayor. Aunque se han desarrollado convertidores de potencia que proporcionan tensiones y corrientes elevadas capaces de cargar este tipo de baterías en menos de 15 minutos, se carece de un estudio preciso y fiable del comportamiento que tendrá la batería bajo esos severos regímenes de carga.

En esta sección se estudia el comportamiento de las baterías de Ni-MH bajo diferentes razones de carga y diferentes condiciones de temperatura ambiente, al igual que se hizo con la tecnología de Ni-Cd, siempre sin rebasar los límites de funcionamiento de las baterías para no deteriorarlas.

Al igual que las baterías de Ni-Cd, las baterías de Ni-MH tienen un electrodo positivo de níquel y el electrolito es hidróxido de potasio. La principal diferencia se encuentra en su electrodo negativo, en el caso del binomio níquel-cadmio este electrodo es de cadmio y en las baterías de Ni-MH es de hidruros metálicos, donde el principal elemento que actúa como material activo es el hidrógeno.

A diferencia de las baterías de Ni-Cd, que solo producen hidrógeno al final de la carga, las baterías de Ni-MH producen hidrógeno durante todo el proceso de carga. Además, el hidrógeno es parte del material activo a través del cual se establecen las reacciones de carga-descarga y, por este motivo, no puede permitirse su salida continua al exterior. Esta es una de las razones fundamentales por la que casi la totalidad de las baterías de Ni-MH se construyen selladas. Esto permite además, que se produzcan las reacciones de recombinación de gases y se estabilicen las

presiones internas que pueden registrar valores de hasta 50 bares. De cualquier forma, las baterías de Ni-MH poseen unas válvulas de seguridad que liberan los gases producto de la sobrecarga una vez que se supera la presión límite establecida. Una vez que la presión interna vuelve a estar dentro de los valores admitidos la válvula sella nuevamente las celdas.

En los ensayos realizados con esta tecnología de batería utilizando razones de carga bajas (0,1C) se ha observado que la batería comienza a liberar hidrógeno una vez alcanzado el estado de plena carga. Este fenómeno permite utilizar la detección de hidrógeno para establecer el punto de finalización de la carga, al igual que en la tecnología de Ni-Cd.

El rápido incremento de la temperatura durante la carga, incluso cuando se utilizan razones de carga bajas, hace necesaria la inclusión también de límites de temperatura para detener el proceso de carga. No tiene sentido continuar aplicando carga a temperaturas altas pues el deterioro de la batería y su envejecimiento prematuro son bien conocidos.

4.3.1 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH en función de la razón de carga utilizada y manteniendo en 23 °C la temperatura ambiente

Antes de realizar los ensayos para estudiar el comportamiento de las baterías de Ni-MH bajo diferentes razones de carga se sometió a las baterías a los pertinentes ciclos de acondicionamiento (ver capítulo 3).

A continuación se detalla la respuesta de las baterías de Ni-MH bajo diferentes razones de carga (0,1C, 0,2C, 0,5C y 1,0C) y a temperatura ambiente de 23 °C. No se realizaron pruebas de carga con razones superiores a 1,0C debido a que el comportamiento observado a esta razón sugería evitar el aumento de la razón de carga, fundamentalmente por el fuerte incremento de la temperatura.

4.3.1.1 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,1C

La tensión de celda de las batería de Ni-MH cuando se cargan a 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C se muestra en la figura 4-52. Como se puede apreciar, la curva de tensión es más plana en las baterías de Ni-MH que en las de Ni-Cd durante la mayor parte del proceso de carga. Otra característica importante es que el incremento de tensión que se produce al final de la carga es mucho menos pronunciado que en el caso de las baterías de Ni-Cd (menor de 1 mV/min.). Éste puede ser un problema importante si se utiliza la velocidad de cambio de la tensión para determinar el final de la carga. En el caso de la figura 4-52, la carga se finalizó cuando se detectó hidrógeno, producto de la entrada en sobrecarga al final del proceso de carga.

A partir del comportamiento observado en cada batería estudiada se determinó su capacidad, capacidad que se establece como punto de referencia (capacidad nominal) para todas las pruebas de carga a diferentes regímenes puesto que siempre se emplean las mismas condiciones de descarga. Como se comenta en el capítulo 3, las condiciones de la descarga son una razón de descarga de 0,2C, una tensión de finalización de la descarga de 1 V/celda y una temperatura de trabajo de 23 °C.

La evolución de la temperatura en la batería durante la carga se muestra en la figura 4-53. Como se puede apreciar, en las baterías de Ni-MH la temperatura se incrementa desde el inicio de la carga aún cuando la razón de carga aplicada sea baja (0,1C). Las reacciones de carga en las baterías de Ni-MH son de naturaleza exotérmica, a diferencia de las reacciones de carga en las baterías de Ni-Cd. Esto hace necesario un control más riguroso de la temperatura de las baterías durante la carga; de hecho, las baterías de Ni-MH para sistemas de potencia donde se requieren repetidos ciclos de carga-descarga vienen con sensores de temperatura incorporados.

También hay que señalar que durante la carga a 0,1C se produce un cambio brusco de la temperatura de la batería en la parte final de la carga que se puede utilizar para

detectar el momento de finalización de la carga. Durante esta parte del proceso, la temperatura varía entre 0,1 °C/min. y 0,2 °C/min.

En la tabla 4-15 se resumen los principales índices de comportamiento de las baterías bajo una razón de carga de 0,1C, a 23 °C. El incremento de la temperatura al final de la carga es de 9 °C (prácticamente igual al que se observa en las baterías de Ni-Cd cuando se les aplica una razón de carga de 2,0C).

La recarga de la batería supone un tiempo de 610 minutos, algo más de 10 horas, ya que la eficiencia del proceso no es del 100 por ciento.

La aceptación de carga observada es baja (91,5 por ciento) si se compara con la obtenida en las baterías de Ni-Cd (por encima del 96 por ciento) para la misma razón de carga.

La eficiencia energética obtenida en los ciclos de carga-descarga realizados en estas condiciones de carga fue de aproximadamente el 87 por ciento. Este rendimiento es similar al observado durante la aplicación de esta razón de carga en las baterías de Ni-Cd (entre un 85 y un 86 por ciento).

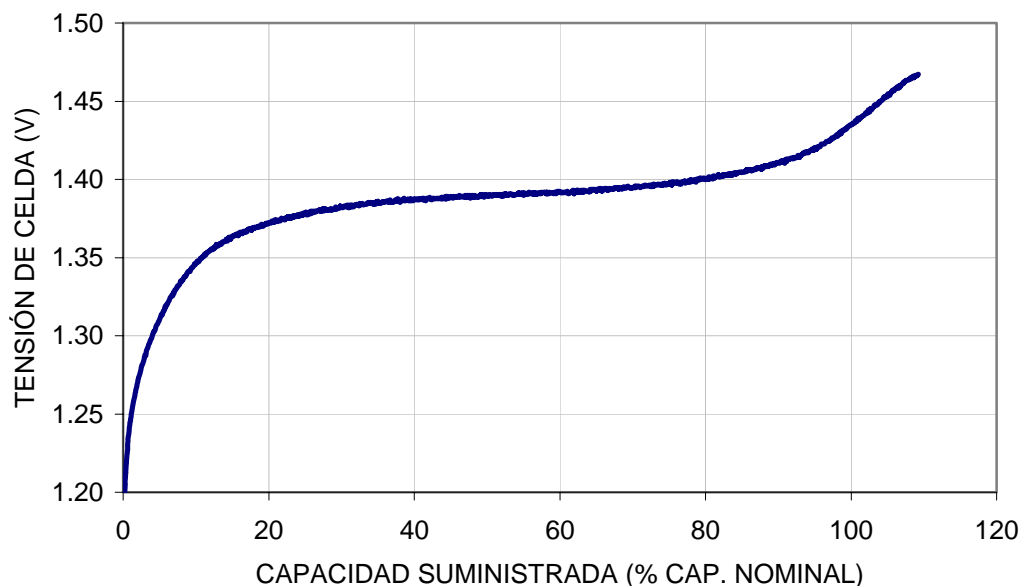


Figura 4-52. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

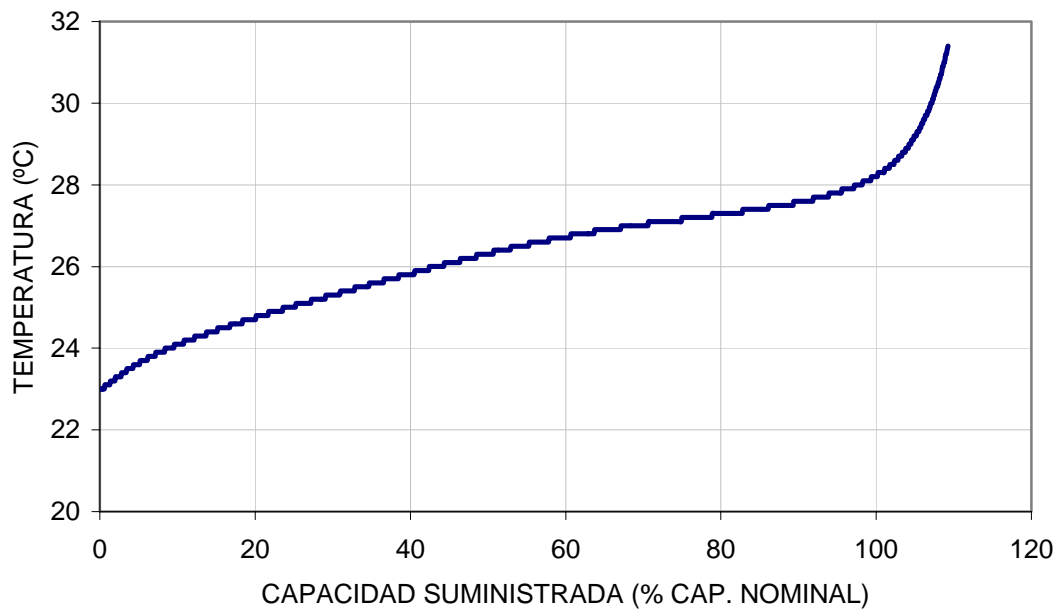


Figura 4-53. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,1C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	610
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	109
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	100
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	91,5
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	87,3
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	9

Tabla 4-15. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

4.3.1.2 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,2C

La gráfica de la figura 4-54 muestra la evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH cuando se cargan con una razón de 0,2C y a 23 °C de temperatura ambiente. En esta figura se puede observar que la tensión de celda aumenta con la razón de carga aplicada (es mayor que la observada para una razón de carga de 0,1C) como era de esperar.

La velocidad de cambio en la tensión justo antes de la entrada en sobrecarga es más fuerte en este caso que cuando se aplica una razón de carga de 0,1C. Sin embargo, la velocidad de cambio (1 – 2 mV/min. por celda) en la parte final de la carga continúa siendo mucho menos notable que la observada en las baterías de Ni-Cd (25 mV/min. por celda).

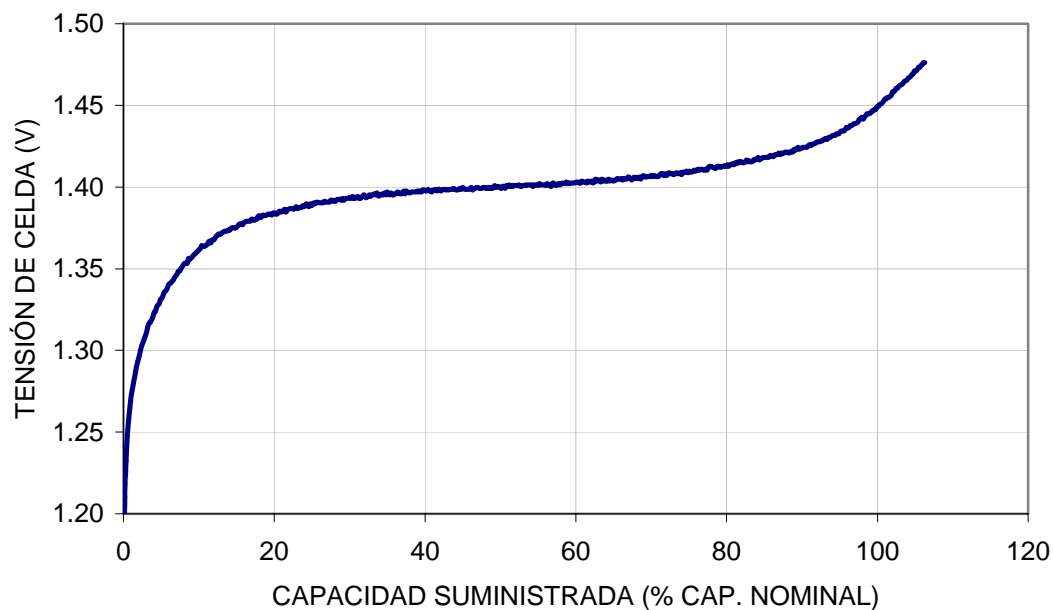


Figura 4-54. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

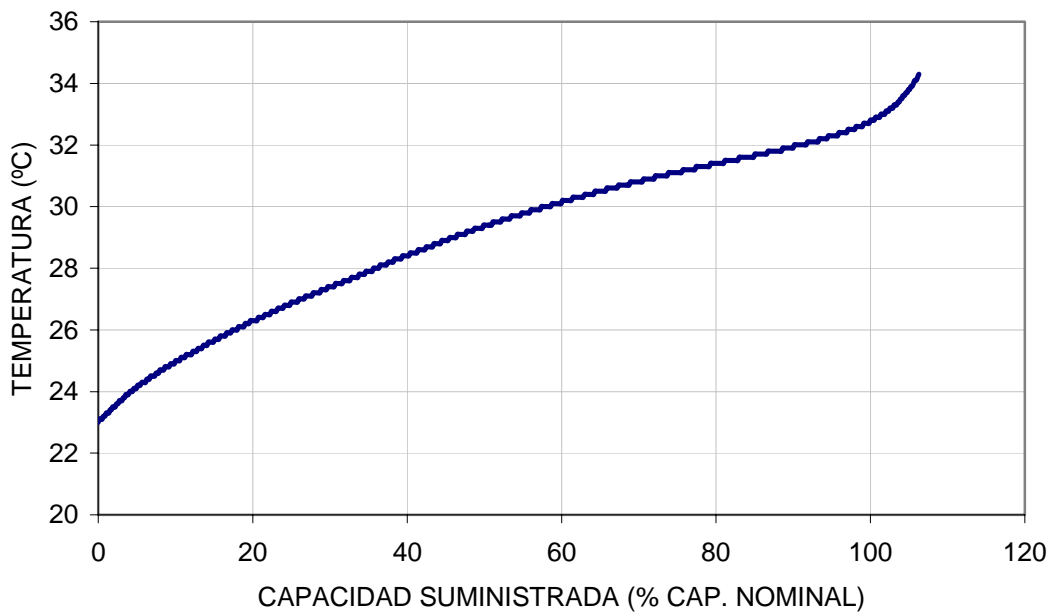


Figura 4-55. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,2C y a temperatura ambiente de 23 °C.

La evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante la carga a 0,2 C se muestra en la figura 4-55. El incremento de temperatura que se observa bajo estas condiciones es de 11 °C; a pesar de que la razón de carga es el doble que la empleada en las pruebas realizadas a 0,1C, el incremento de temperatura con respecto a éstas es de solo 2°C. En la parte final del proceso de carga se observa un cambio en la pendiente de la temperatura que alcanza los 0,2 °C/min.

En la tabla 4-16 se resumen los principales índices de comportamiento de las baterías. Al utilizar la razón de carga de 0,2C, se produce una reducción significativa del tiempo de recarga de la batería (aproximadamente 5 horas con respecto a las 10 horas necesarias para 0,1C). Además, la capacidad que se descarga de la batería es prácticamente la capacidad nominal (obtenida durante la carga a 0,1C). En este sentido el comportamiento de las baterías de Ni-MH puede calificarse de muy bueno.

La aceptación de carga se incrementa desde un 91 por ciento hasta el 94 por ciento y la eficiencia energética disminuye sólo un 3 por ciento respecto a las características observadas para una carga a 0,1C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,2C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	313
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	106,3
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	99,6
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	94,1
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	84,1
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	11

Tabla 4-16. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,2C y temperatura ambiente de 23 °C.

4.3.1.3 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C

La figura 4-56 muestra la evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C. Al aumentar la razón de carga aumenta la tensión de celda pero el cambio en la pendiente al final de la carga sigue siendo bastante lenta y difícil de detectar. En este caso, la tensión al final del proceso de carga se incrementa entre 2 y 3 mV/min. por celda. Generalmente, las baterías de Ni-MH se componen de varias celdas conectadas en serie y es posible medir incrementos de tensión mayores. Por ejemplo, los módulos utilizados para las pruebas de laboratorio tienen una tensión nominal de 12 V (se componen de 10 celdas conectadas en serie).

La evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C se muestra en la figura 4-57. Como se puede observar en esta gráfica, el incremento de la temperatura desde el comienzo de la carga hasta su finalización es de aproximadamente 21 °C (ver tabla 4-17). En este caso y a

diferencia de los casos anteriores (carga a 0,1C y 0,2C) no se observa claramente el cambio en la pendiente de la temperatura al final de la carga. Es decir, la carga ha finalizado por la detección de hidrógeno y aún no se observa un cambio significativo de la temperatura; la temperatura es una variable de evolución lenta y en casos como éste su empleo puede inducir a error al no detectarse correctamente el fin de la carga.

Aún cuando la carga se realiza a temperatura ambiente de 23 °C, el incremento que se produce en la temperatura de las baterías la acerca a la temperatura límite de funcionamiento continuo de esta tecnología (45 °C). El funcionamiento por encima de esta temperatura supone una limitación del número de ciclos de carga-descarga a que se puede someter estas baterías; por tanto, la limitación de la carga rápida cuando la batería alcanza los 45 °C es necesaria a fin de obtener un mejor rendimiento de las baterías.

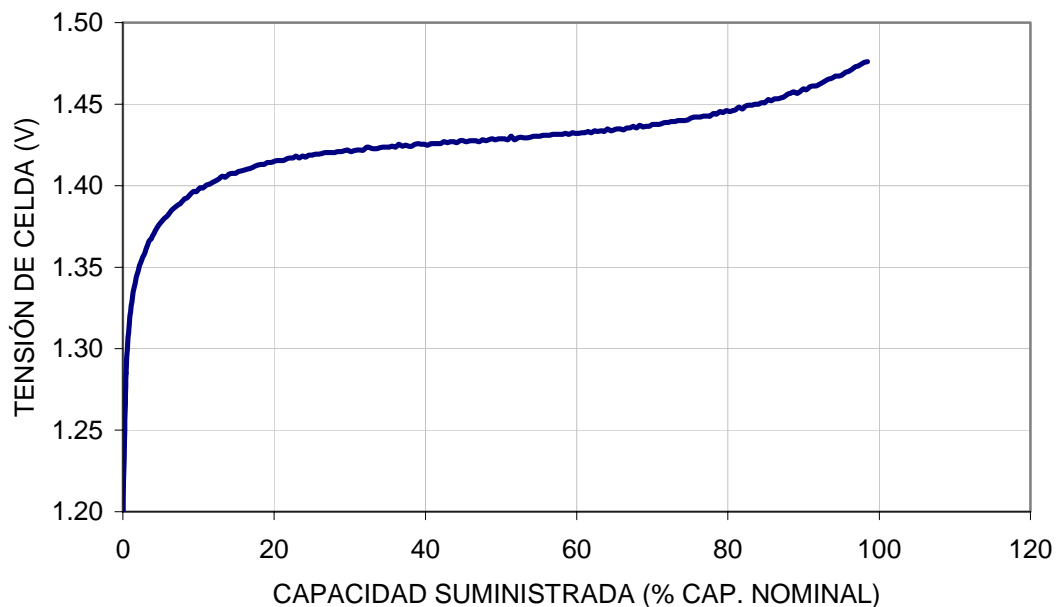


Figura 4-56. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y a temperatura ambiente de 23 °C

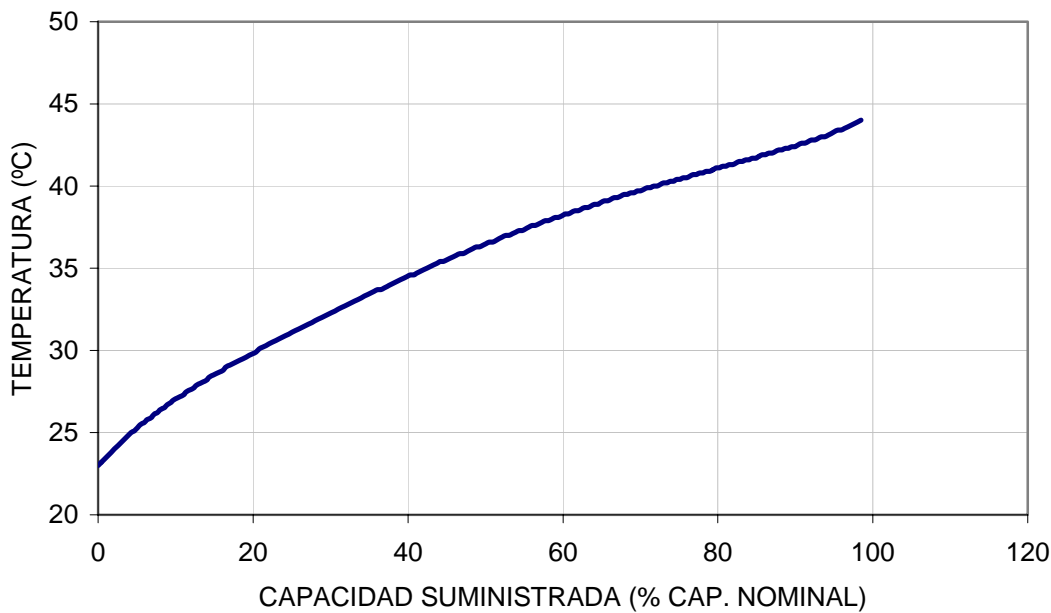


Figura 4-57. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y a temperatura ambiente de 23 °C.

En la tabla 4-17 se resumen los principales índices de funcionamiento analizados durante la carga de las baterías de Ni-MH a una razón de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.

En estas condiciones, el tiempo de recarga es inferior a las 2 horas y durante ese tiempo se llega a suministrar un 98,5 por ciento de la capacidad nominal de la batería, antes de finalizar la carga debido a la detección de hidrógeno.

Para esta razón de carga se constata una reducción de la capacidad que puede ser descargada de la batería de aproximadamente un 6 por ciento de la capacidad nominal (calculada para una razón de carga de 0,1C). Así, la aceptación de carga supera el 96 por ciento, incrementándose algo más de un 4 por ciento con respecto a la que se obtiene cuando la carga se realiza a 0,1C.

La eficiencia energética no experimenta cambios significativos con respecto a la obtenida con una carga a 0,2C y mantiene su valor en un 84 por ciento.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	116
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	98,5
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	94,4
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,2
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	84,5
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	21

Tabla 4-17. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.

4.3.1.4 Evolución de la tensión y de la temperatura en baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C

La carga de una batería de Ni-MH de media y gran capacidad a 1,0C comienza a presentar efectos negativos asociados, fundamentalmente, con el incremento excesivo de la temperatura.

La figura 4-58 muestra la evolución de la tensión de celda de las baterías de Ni-MH cuando se cargan con una razón de 1,0C a temperatura ambiente de 23 °C. El incremento de tensión que se produce en la parte final del proceso de carga debido a la entrada en sobrecarga de la batería, es casi nulo. El aumento de temperatura que se produce desde el inicio de la carga hace que se llegue al final del proceso con una temperatura muy alta. Esta temperatura tan alta provoca una disminución de la tensión de celda que es más significativa al final de la carga, cuando más caliente se encuentra la batería. Este fenómeno dificulta una medida sencilla de la variación de la tensión para utilizarla como variable de finalización de la carga: el incremento de la temperatura enmascara el crecimiento de la tensión de celda.

En la figura 4-59 se muestra la evolución de la temperatura durante el proceso de carga. Aún cuando la pendiente de la temperatura decrece durante el proceso de carga y no se observa ningún crecimiento en la parte final de la carga (cuando se detecta la presencia de hidrógeno), la temperatura que se alcanza es demasiado alta (aproximadamente 55 °C). Hay que tener en cuenta que la temperatura máxima indicada para esta tecnología de baterías es de 60 °C (la batería sólo puede quedar expuesta a esta temperatura durante muy poco tiempo a lo largo de su vida útil) y en funcionamiento normal no deben superarse los 45 °C. El trabajo por encima de esta temperatura está directamente relacionado con la disminución de la vida cíclica de la batería. Por este motivo, aún cuando se requiera de una carga rápida, no debe superarse esta temperatura. Además, en las aplicaciones donde se requiere carga rápida, normalmente la batería está sometida a repetidos ciclos de carga-descarga por lo que no es conveniente un funcionamiento frecuente a temperaturas elevadas.

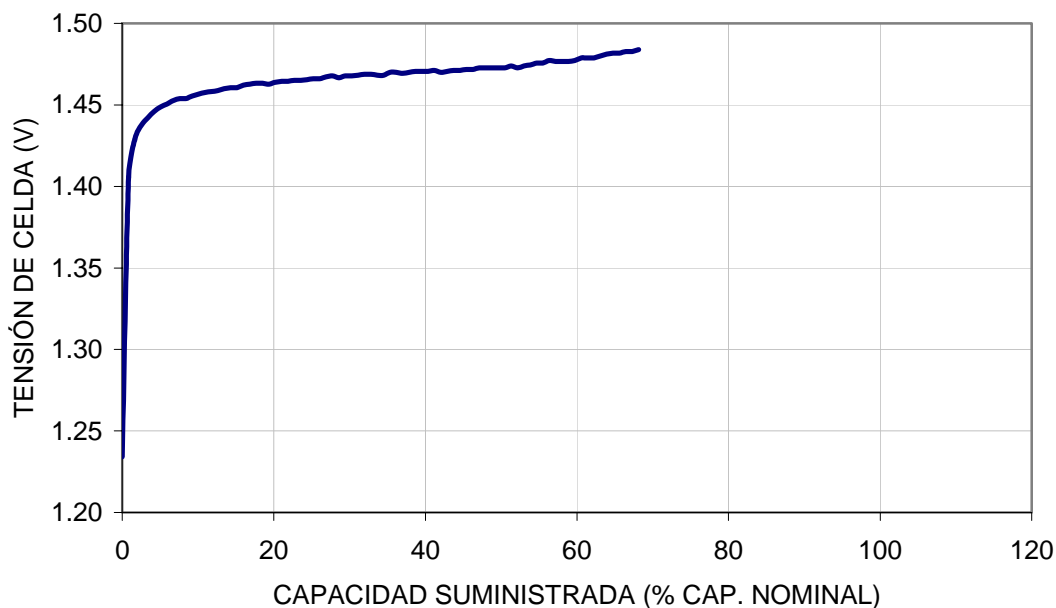


Figura 4-58. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0 C y temperatura ambiente de 23 °C

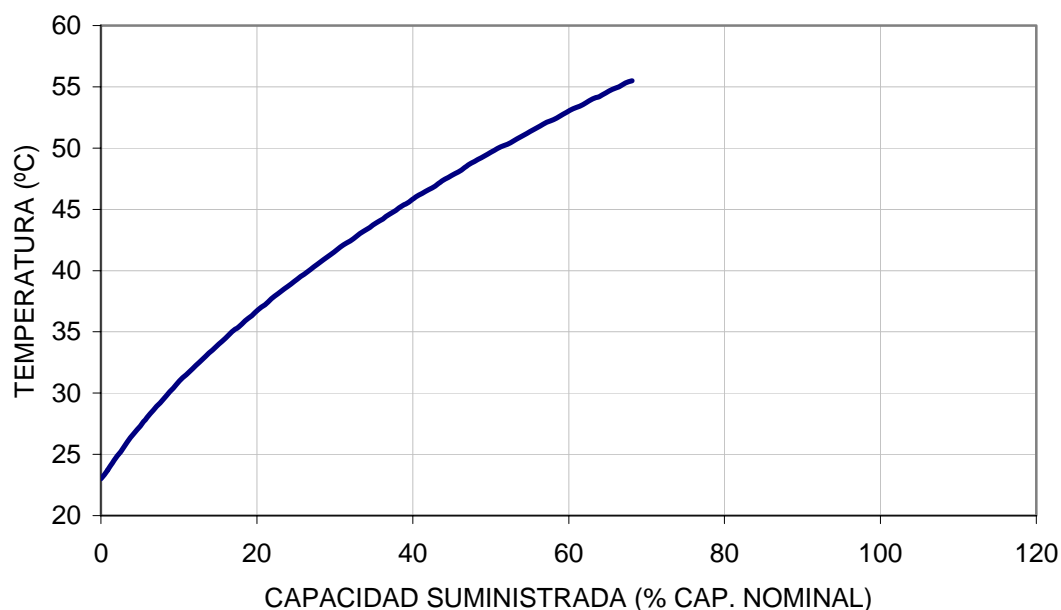


Figura 4-59. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

En las figuras 4-60 y 4-61 se muestran las curvas de tensión de celda y de evolución de la temperatura cuando la carga se detiene porque se supera el límite de temperatura de 45 °C y no porque se haya detectado hidrógeno a través de los sensores.

En los ensayos realizados a razones de carga inferiores a 1,0C y a 23 °C, la temperatura de la batería no supera nunca los 45 °C por lo que la finalización de la carga se debe siempre a la detección de hidrógeno. Sin embargo, en los procesos de carga realizados bajo otras condiciones se observa que el final del proceso se debe en muchos casos a que actúa la protección de temperatura límite de funcionamiento (45 °C). Esta protección impide que las baterías se vean sometidas a temperaturas excesivas que degradan sus características. De esta forma, se puede evaluar la respuesta de las baterías ante carga rápida sin sobrecargarlas ni hacerlas trabajar en condiciones que acortan de forma significativa su vida cíclica. Hay que recordar que las pruebas de carga no persiguen un fin destructivo sino verificar el comportamiento de las baterías bajo diferentes razones de carga y diferentes condiciones de temperatura.

Las tablas 4-18 y 4-19 muestran los principales índices de funcionamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 1,0C (23 °C), deteniendo el proceso de carga cuando se detecta hidrógeno (4-18) o finalizando la carga cuando se alcanza la temperatura límite de 45 °C (4-19).

El tiempo que tarda la batería en alcanzar la temperatura de 45 °C es de aproximadamente 24 minutos, y en estas condiciones solo se puede suministrar a la batería un 40 por ciento de su capacidad nominal. Sin embargo, si se deja continuar la carga hasta detectarse la producción de hidrógeno, la carga dura aproximadamente 40 minutos suministrándose una capacidad a la batería del 68 por ciento de su capacidad nominal, es decir un 28 por ciento adicional de capacidad (ver tablas 4-18 y 4-19). Si bien es cierto que se le suministró a la batería un porcentaje mayor de capacidad, también es importante destacar que se sometió a la batería a una temperatura elevada (por encima de 45 °C) durante prácticamente la segunda mitad del proceso de carga. El funcionamiento en estas condiciones limita fuertemente la vida cíclica de la batería y no debe permitirse, fundamentalmente cuando se utilizan razones de carga altas.

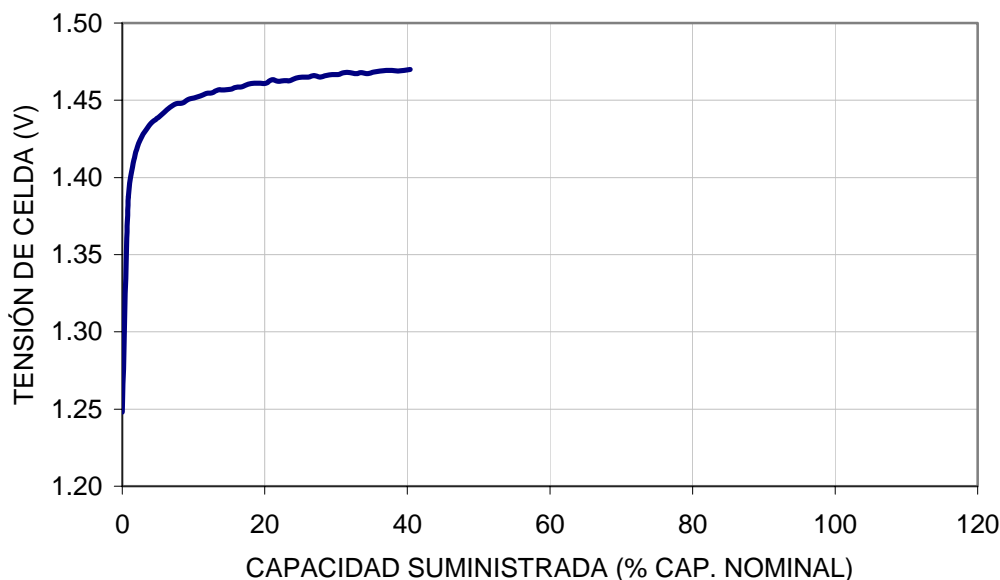


Figura 4-60. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 23 °C. Finalización de la carga cuando se supera la temperatura de 45 °C.

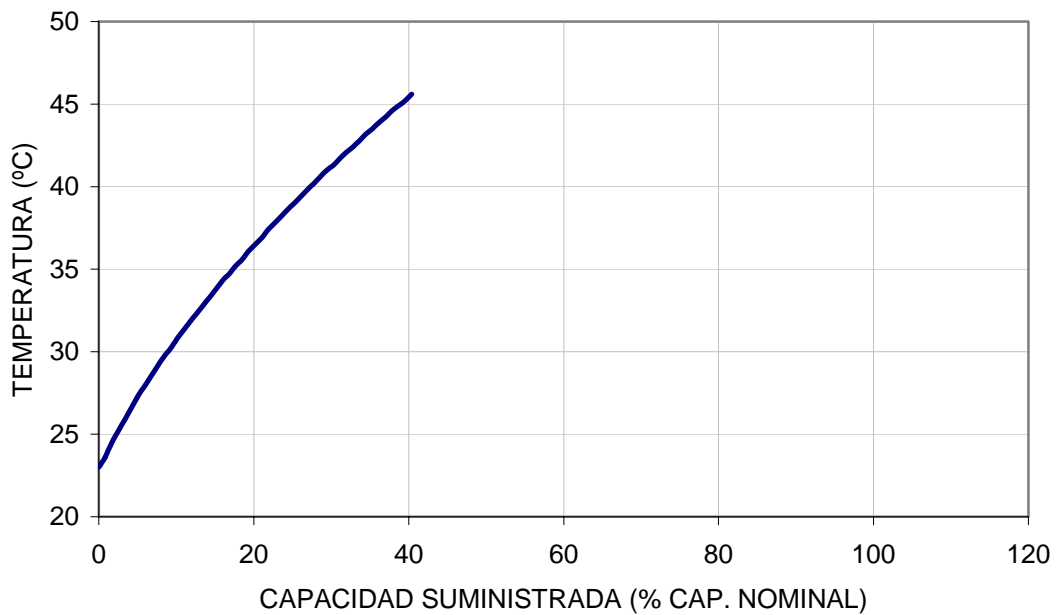


Figura 4-61. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 23 °C. Finalización de la carga cuando se supera la temperatura límite de 45 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	41
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	68,1
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	64,2
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	94,2
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	80,1
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	32

Tabla 4-18. Características de funcionamiento en carga de las baterías de Ni-MH a 1,0C y temperatura de 23 °C. Finalización de la carga cuando se detecta hidrógeno.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 23 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	24
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	40,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	38,9
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,3
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	82
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	23

Tabla 4-19. Características de funcionamiento en carga de las baterías de Ni-MH a 1,0C y temperatura de 23 °C. Finalización de la carga cuando se supera la temperatura límite de 45 °C.

En cualquier caso, la capacidad que se puede obtener de las baterías de Ni-MH cuando se cargan con una razón de 1,0C y a temperatura ambiente de 23 °C es muy baja. Aún cuando se permite continuar el proceso de carga hasta que se detecta la producción de hidrógeno, sin tener en cuenta el límite de temperatura, solo se puede descargar una capacidad del 64 por ciento de la capacidad nominal de la batería. Por tanto, no se justifica someter a la batería a temperaturas elevadas que pueden dañarla para conseguir un porcentaje adicional de carga tan bajo.

Evidentemente, la carga puede continuar a razones de corriente bajas (inferiores a 0,1C) para intentar reponer la capacidad restante pero, en ese caso, el tiempo necesario de carga es mucho mayor y se pierde el objetivo de recargar en el menor tiempo posible.

Tanto la aceptación de carga como la eficiencia energética disminuyen aproximadamente un 2 por ciento cuando la carga se mantiene hasta la detección de hidrógeno con respecto al caso de finalización de la carga por alcanzarse la

temperatura límite de 45 °C. Por otro lado, la eficiencia energética se reduce en aproximadamente un 7 por ciento con respecto a la que se obtiene cuando se utiliza una razón de carga de 0,1C.

La tecnología de Ni-MH ofrece prestaciones altas pero presenta, de momento, un precio elevado. Por tanto, es fundamental mantener la vida útil de estas baterías haciéndolas funcionar en condiciones óptimas para amortizar los gastos de su adquisición. La carga rápida puede aplicarse pero hay que definir bien los límites dentro de los que deben funcionar las baterías. Por tanto, después de analizar el comportamiento de las baterías de Ni-MH bajo la razón de carga de 1,0C y 23 °C, no se considera adecuado aumentar la razón de carga a 2,0C.

4.3.1.5 Conclusiones acerca del comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a diferentes razones de carga y temperatura de 23 °C

En esta sección se resumen de forma gráfica los principales índices de comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando funcionan bajo razones carga desde 0,1C hasta 1,0C y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

La gráfica de la figura 4-62 muestra los tiempos de carga observados en las baterías de Ni-MH desde el comienzo de la carga hasta su finalización por la detección de hidrógeno (solo en el caso de utilizar la razón de carga de 1,0C se detuvo la carga por haberse superado el límite de temperatura de funcionamiento). Estos tiempos de carga están expresados como porcentajes del tiempo necesario para recargar la batería a 0,1C (aproximadamente 10 horas). Como ya se ha analizado en las secciones anteriores, la simple reducción del tiempo de carga no indica nada por sí sola. Es necesario comprobar en cada caso la capacidad que es posible suministrar a la batería durante ese tiempo de carga y, además, evaluar los índices de funcionamiento para conocer si es factible o no la utilización de una determinada razón de carga.

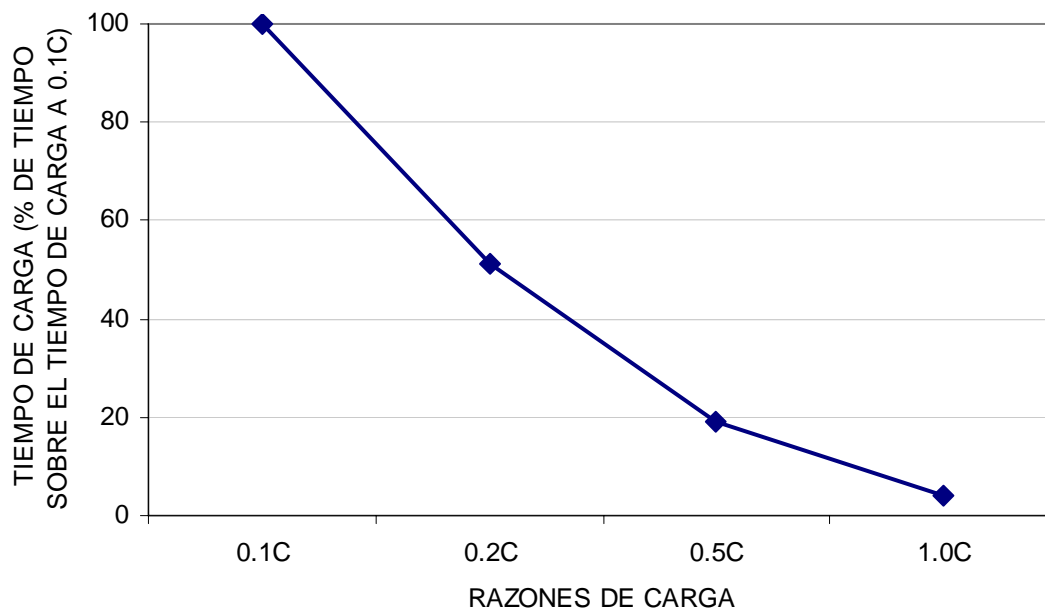


Figura 4-62. Tiempo de carga necesario para cargar las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

En este sentido, es importante relacionar los tiempos que se muestran en la figura 4-62 con las capacidades que es posible suministrar a la batería durante esos tiempos de recarga.

En la figura 4-63 se muestra la capacidad que admiten las baterías de Ni-MH bajo diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C. La capacidad suministrada a la batería es alta para las razones de carga de 0,1C, 0,2C y 0,5C (por encima del 95 por ciento de la capacidad nominal de la batería). Además, en ninguno de estos casos se supera la temperatura de funcionamiento límite de la batería.

Sin embargo, cuando se utiliza la razón de carga de 1,0C, apenas se logra suministrar a la batería un 40 por ciento de su capacidad nominal (la carga finalizó cuando se alcanzó la temperatura máxima de funcionamiento). En estas condiciones no se puede considerar que la reducción del tiempo de carga sea efectiva pues la batería no alcanza durante la descarga ni la mitad de su capacidad nominal (se

considera una carga completa si la batería queda cargada con al menos un 90 por ciento de su capacidad nominal).

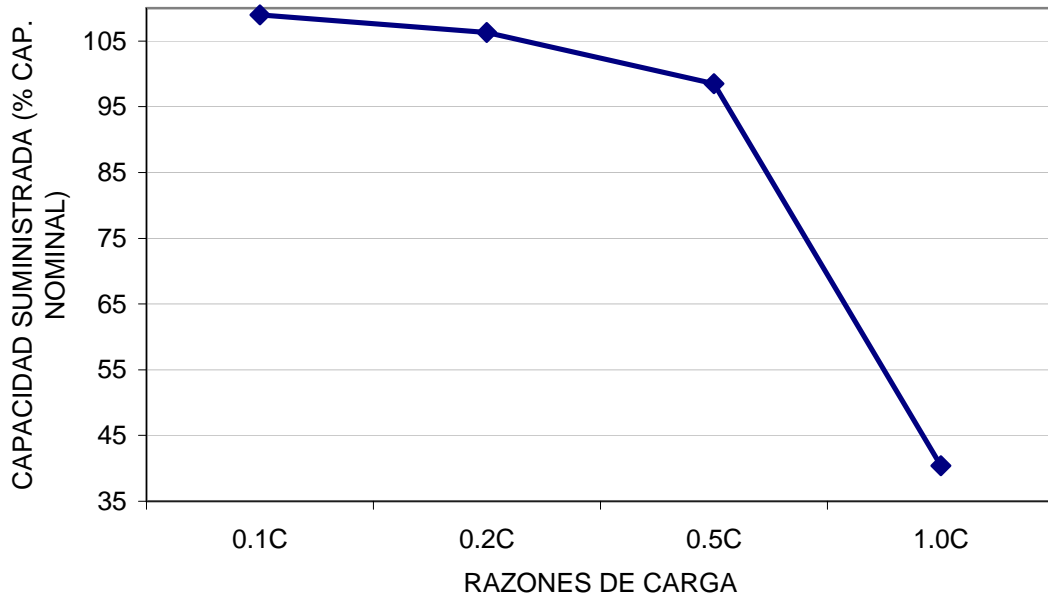


Figura 4-63. Capacidad suministrada a las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

En la figura 4-64 se muestran los resultados obtenidos respecto a la capacidad descargada de las baterías cuando se utilizaron diferentes razones de carga y ésta se realizó a 23 °C de temperatura ambiente. Estos resultados están estrechamente vinculados con la capacidad suministrada (ver figura 4-63) y la aceptación de carga (ver figura 4-65).

Como se puede apreciar, puede utilizarse sin mayores problemas una carga de hasta 0,5C a temperatura de 23 °C para recargar las baterías de Ni-MH. La capacidad descargada de las baterías supera el 90 por ciento de su capacidad nominal. La aceptación de carga mejora con el incremento de la razón de carga y alcanza el 96 por ciento (un 5 por ciento por encima de la obtenida cuando la razón de carga es 0,1C).

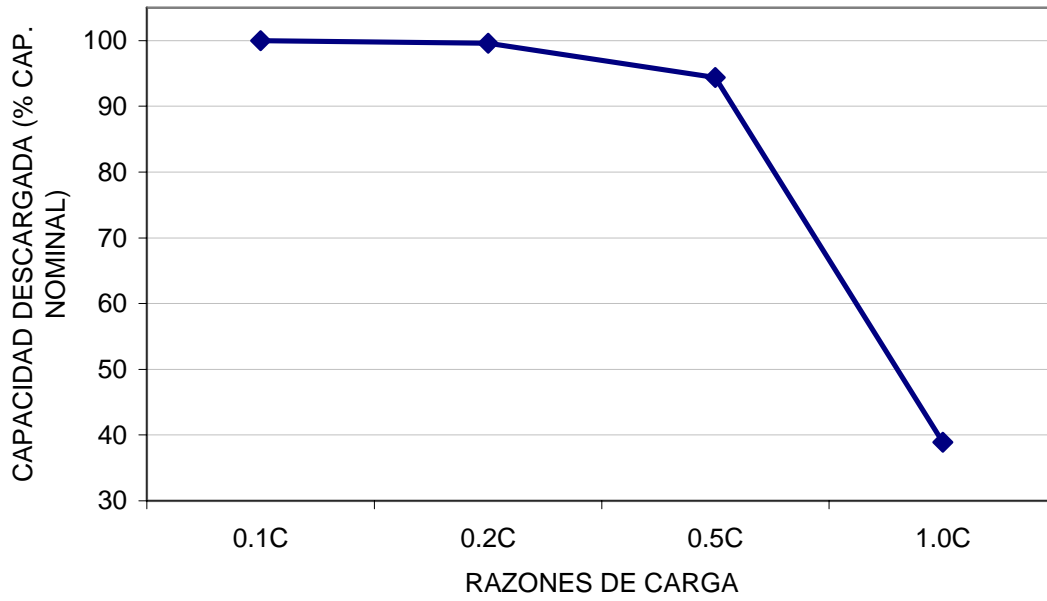


Figura 4-64. Capacidad descargada de las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

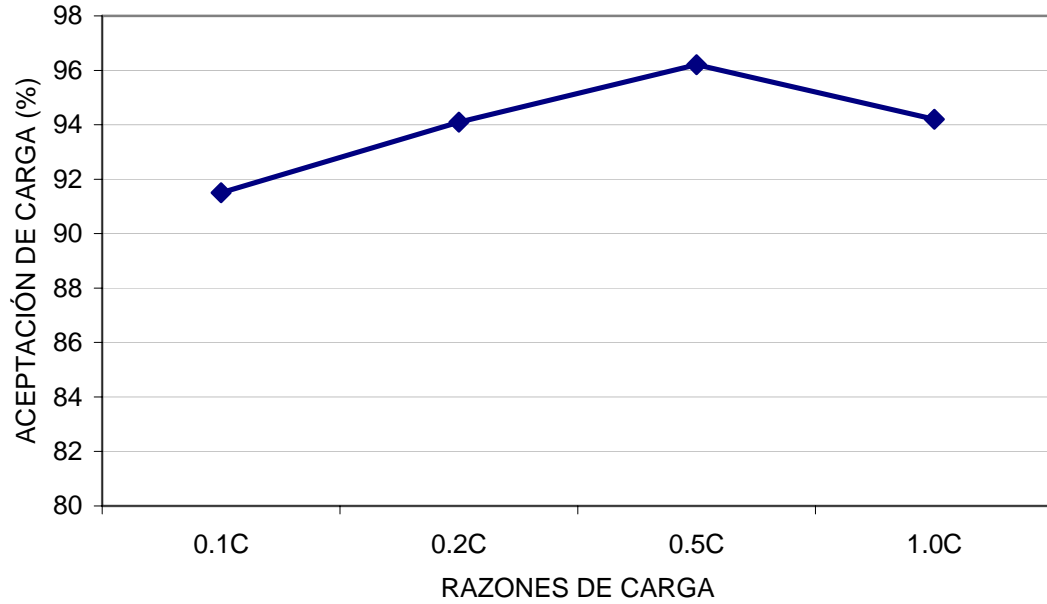


Figura 4-65. Aceptación de carga en las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

El incremento de temperatura en las baterías sobre la temperatura ambiente de 23 °C se puede observar en la figura 4-66. Los aumentos de temperatura durante la carga son mucho más grandes que los observados en las baterías de Ni-Cd y constituyen sin ninguna duda una limitación a la hora de utilizar razones de carga altas para acortar los tiempos de recarga en las baterías de Ni-MH.

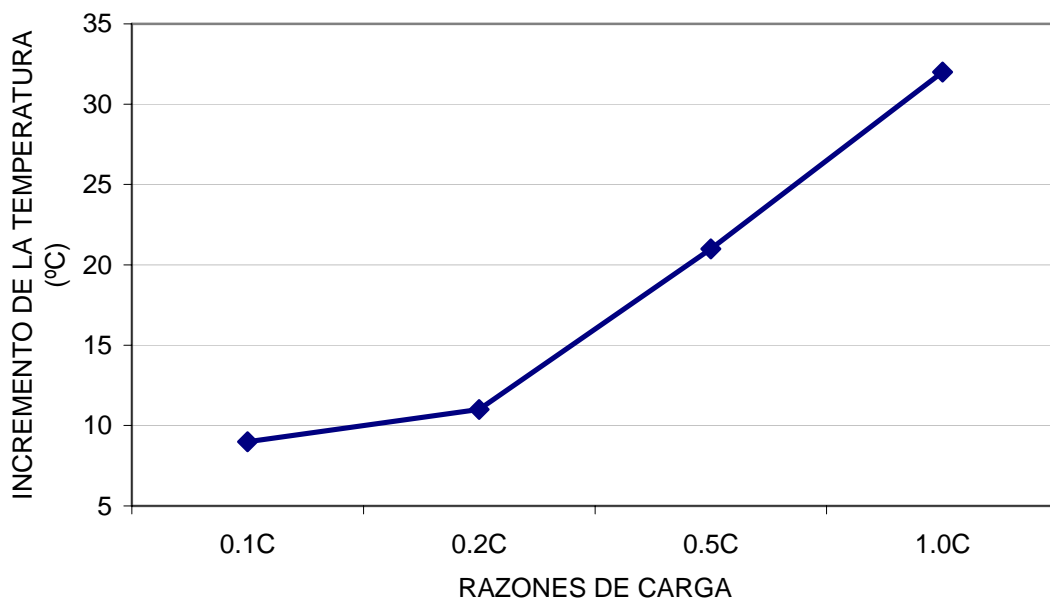


Figura 4-66. Incremento de la temperatura producido en las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

La eficiencia energética observada durante los ciclos de carga-descarga de las baterías de Ni-MH para diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C, se muestran en la figura 4-67. Puesto que siempre que se aumenta la razón de carga disminuye la eficiencia energética del proceso de carga-descarga de la batería, es necesario un compromiso técnico-económico entre la necesidad de utilizar carga rápida y la pérdida de eficiencia que eso representa.

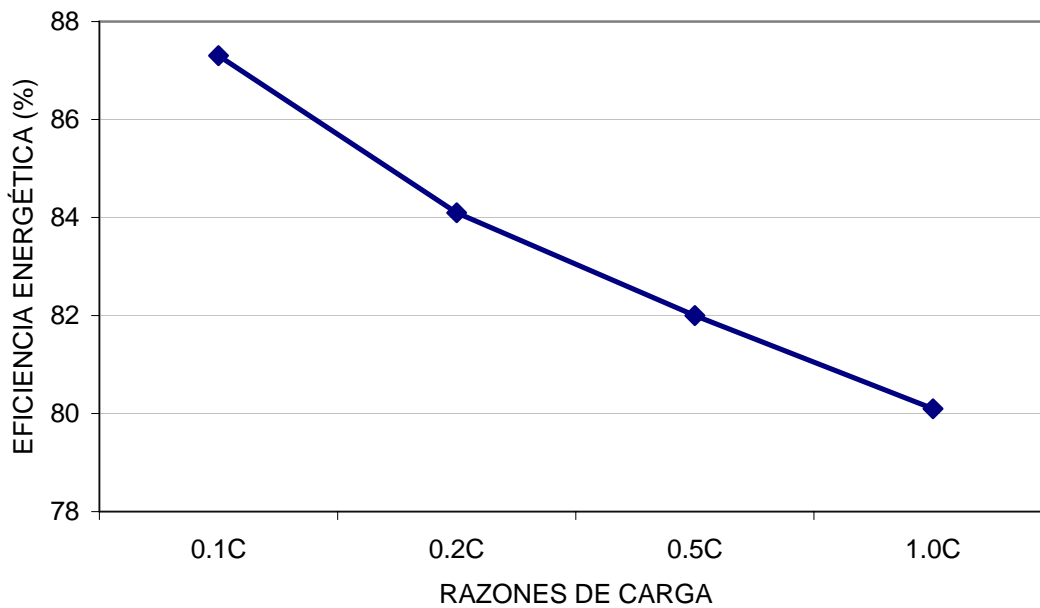


Figura 4-67. Eficiencia energética de los procesos de carga-descarga en las baterías de Ni-MH cuando se utilizan diferentes razones de carga y en un ambiente de temperatura controlada de 23 °C.

4.3.2 Evolución de la tensión y la temperatura en baterías de Ni-MH bajo distintas razones de carga y en función de la temperatura ambiental

Hasta el momento, se ha analizado el comportamiento de las baterías de Ni-MH durante su funcionamiento a diferentes razones de carga pero siempre manteniendo constante la temperatura ambiente en 23 °C.

El comportamiento de la batería y la capacidad real que ésta puede suministrar dependen en gran medida de la temperatura de funcionamiento durante la carga. En esta sección se evalúa el comportamiento de las baterías cuando la temperatura ambiente es diferente de 23 °C.

Como el objetivo fundamental es el estudio del comportamiento de las baterías cuando se las somete a razones de carga altas (carga rápida), el análisis se centra en el comportamiento de las baterías cuando se utilizan las razones de carga de

0,5C y 1,0C. Las baterías de Ni-MH, como se pudo observar durante su comportamiento a 1,0C y 23 °C, se ven afectadas por fuertes incrementos de la temperatura. Esta es una limitante importante para seguir aumentando la razón de carga. Por este motivo, no se realizan pruebas a 2,0C como en el caso de las baterías de Ni-Cd. Las temperaturas en las que se realizan las pruebas, al igual que en las baterías de Ni-Cd, son 5 °C, 15 °C, 23 °C y 33 °C.

4.3.2.1 Funcionamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 0,5C

4.3.2.1.1 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C

El comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 0,5C y temperatura de 23 °C se analizó en la sección 4.3.1.3 de este capítulo. La evolución de la tensión de celda, de la temperatura y el resumen de los principales índices de comportamiento se pueden ver en las figuras 4-56, 4-57 y en la tabla 4-17.

4.3.2.1.2 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C

Durante los procesos de carga estudiados hasta el momento en baterías de Ni-MH se ha comprobado el rápido aumento que experimenta la temperatura. Éste es, sin duda, uno de los problemas fundamentales de esta tecnología de batería, especialmente cuando se requiere una carga rápida en un ambiente donde la temperatura es alta.

La figura 4-68 muestra la evolución de la tensión de celda cuando la batería se carga con una razón de 0,5C y a temperatura ambiente de 33 °C. Como se puede apreciar, no existe ningún indicio en la curva de tensión que nos permita prevenir el sobrecalentamiento de la batería. La tensión sigue una evolución sin cambios significativos mientras la temperatura se eleva hasta niveles límites. En este caso, la carga se finalizó cuando la temperatura rebasó 45 °C.

La figura 4-69 muestra la rápida evolución de la temperatura durante la carga. De hecho, cuando la temperatura alcanza el valor límite (45 °C) solo se ha podido

suministrar a la batería algo más del 40 por ciento de su capacidad nominal. Durante los primeros instantes de la carga la temperatura evoluciona con una velocidad de 0,4 °C/min. que al final se ve reducida a 0,2 °C/min. De continuar aplicando carga, es previsible un incremento en la pendiente de la temperatura, como se ha observado en pruebas donde la razón de carga utilizada ha sido más baja. No obstante, el funcionamiento en altas temperaturas no se justifica ya que va en detrimento de la vida de la batería.

La tabla 4-20 muestra un resumen de los principales indicadores observados durante estas pruebas. Debido a que la temperatura es elevada, la finalización de la carga se produce por límite de temperatura y no por detección de hidrógeno.

Cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C en las baterías de Ni-MH a temperatura elevada (33 °C) se comprueba que la capacidad que es posible descargar posteriormente es muy baja (40 por ciento de su capacidad nominal). Aún así, la aceptación de carga y la eficiencia energética disminuyen muy poco debido a que no se permite la carga más allá de los 45 °C de temperatura. Hay que resaltar que los valores de aceptación de carga y de eficiencia energética mostrados en la tabla 4-20 son valores promedios del resultado obtenido durante toda la carga de la batería. Sin embargo, la aceptación de carga no es igual en cada instante durante su realización (ver figura 4-1, sección 4.1.1.1). No obstante, estos parámetros también pueden verse afectados por la temprana finalización del proceso de carga ya que no se aprovecha toda la zona eficiente de la curva carga.

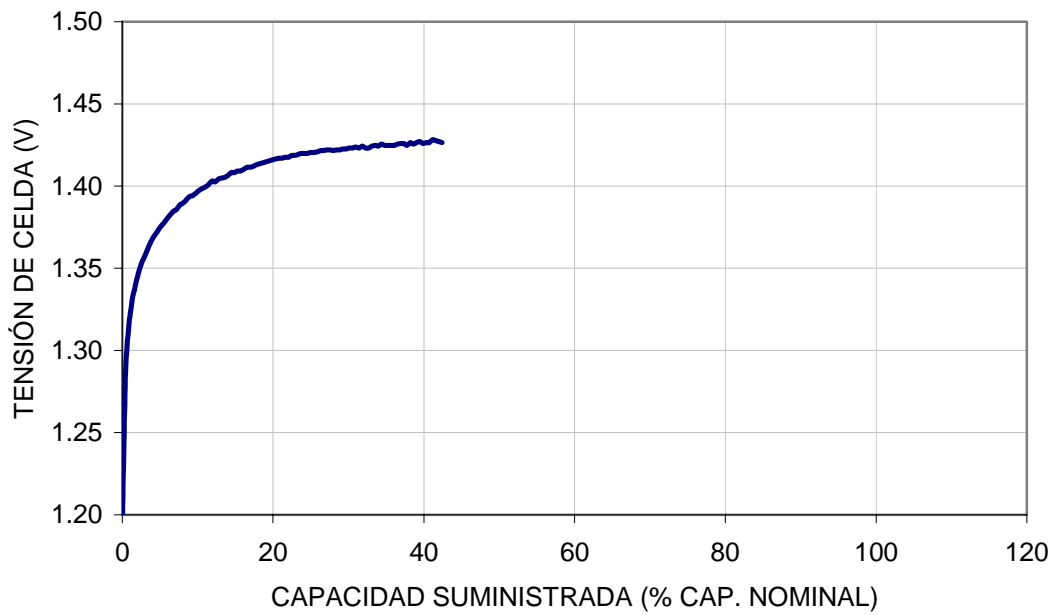


Figura 4-68. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.

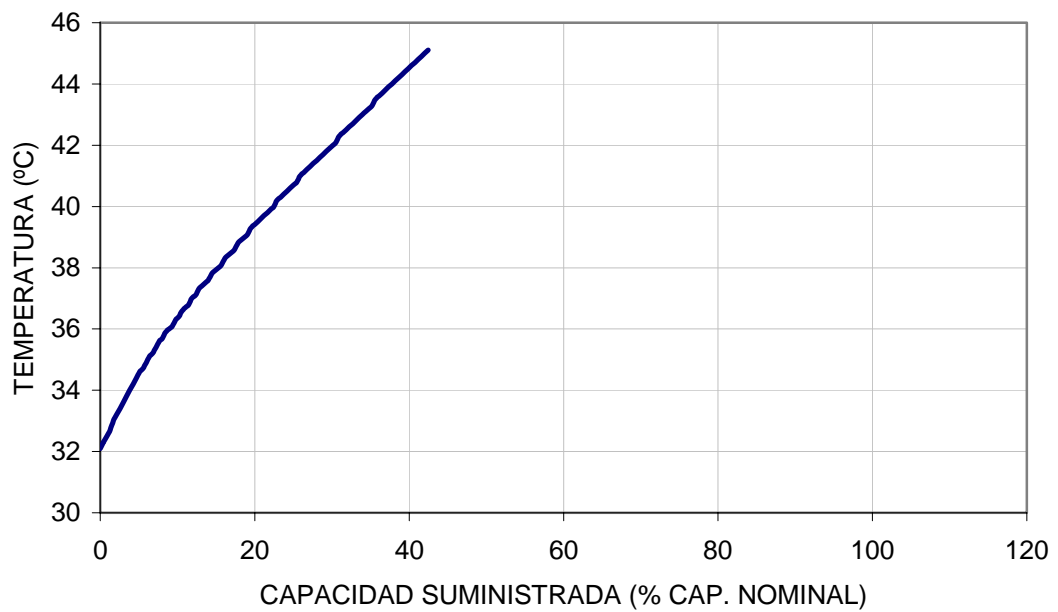


Figura 4-69. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 33 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 33 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	50
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	42,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	40,2
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	95
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	83,8
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	13

Tabla 4-20. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,5C y temperatura de 33 °C.

4.3.2.1.3 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C

Al bajar la temperatura ambiente, existe una mayor posibilidad de completar la carga de las baterías de Ni-MH sin que se alcance la temperatura límite de funcionamiento. Durante la carga a una razón de 0,5C y a temperatura de 15 °C se pudo suministrar a las baterías prácticamente el 100 por ciento de su capacidad nominal.

Las figuras 4-70 y 4-71 muestran la evolución de la tensión de celda y de la temperatura respectivamente. La tensión de celda experimenta un incremento de su pendiente en la parte final del proceso de carga. La velocidad de cambio de la tensión durante la mayor parte del proceso de carga es extremadamente baja; sin embargo, al final de la carga se observan cambios en la pendiente de la curva de tensión de celda de entre 2 y 3 mV/min. Se puede comprobar que este incremento en la pendiente de la tensión se hace más significativo cuando disminuye la temperatura de funcionamiento de la batería.

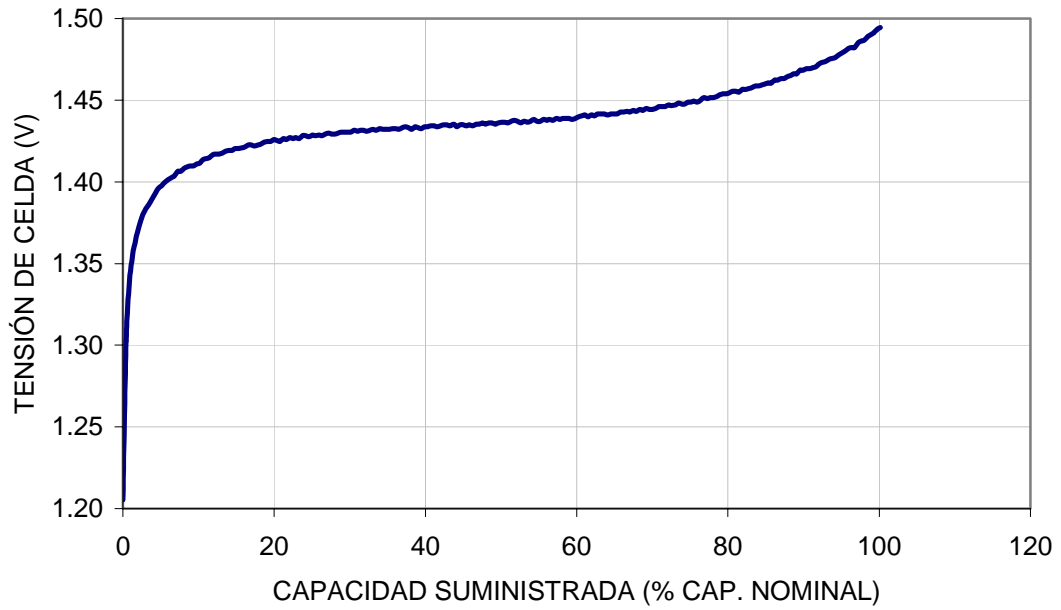


Figura 4-70. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C.

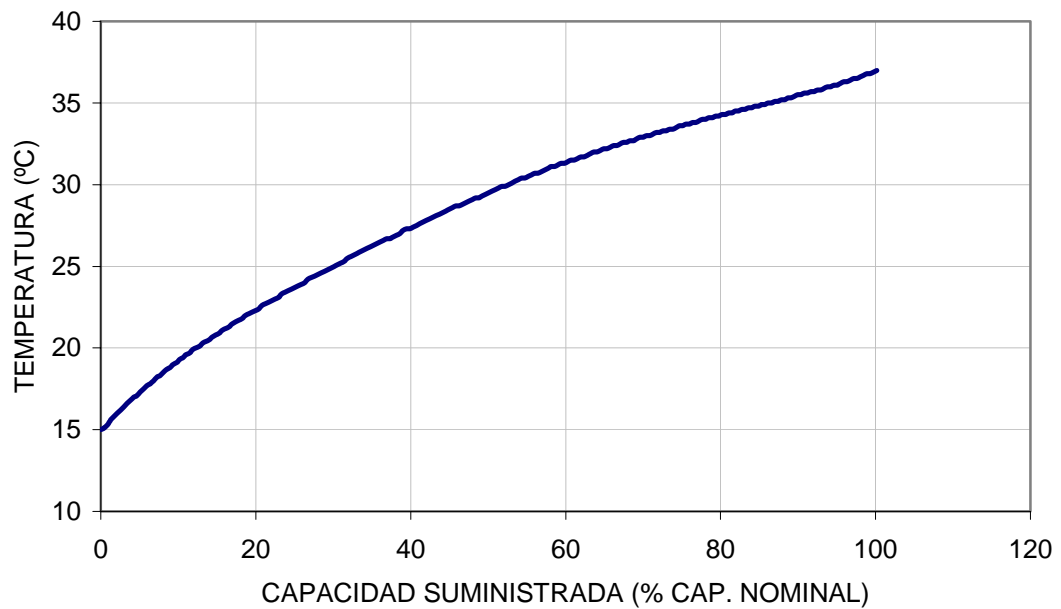


Figura 4-71. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 15 °C.

En la tabla 4-21 se pueden observar los valores obtenidos para los principales indicadores del comportamiento de las baterías cuando se cargan a 0,5C y a temperatura de 15 °C. La capacidad que se puede descargar de las baterías es muy alta (prácticamente un 98 por ciento de su capacidad nominal). Esto se debe fundamentalmente a que se puede suministrar durante la carga la totalidad de la capacidad nominal de la batería, antes de finalizar la carga por la detección de hidrógeno; aún cuando el incremento de la temperatura es de 22 grados no se rebasa el límite de temperatura.

La aceptación de carga en esta prueba supera el 97 por ciento y la eficiencia energética supera el 85 por ciento. El tiempo de carga necesario en estas condiciones es de aproximadamente 2 horas. Por todo lo expuesto, los resultados obtenidos pueden calificarse de muy buenos.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 15 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	118
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	100,2
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	97,8
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,6
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	85,2
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	22

Tabla 4-21. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,5C y temperatura de 15 °C.

4.3.2.1.4 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C

El funcionamiento de cualquier tipo de batería se ve afectado por el trabajo a temperaturas bajas. Por este motivo, siempre resulta interesante comprobar el rendimiento del sistema cuando la batería se carga a 5 °C de temperatura. Cuando la temperatura de funcionamiento es baja, la tensión de celda aumenta y, por consiguiente, las tensiones de salida de los equipos de carga tienen que ser mayores para proporcionar la corriente deseada. Esta es una consideración de diseño importante, fundamentalmente cuando se consideran grupos de baterías con un gran número de celdas conectadas en serie.

La curva de tensión de celda durante la carga de la batería en las condiciones planteadas en esta sección se muestra en la figura 4-72. La pendiente de la tensión de celda en la parte final de la carga es más fuerte a temperaturas bajas, en este caso se alcanzan velocidades de cambio de 3 a 5 mV/min. (cuando la temperatura ambiente es de 23 °C, las velocidades de cambio observadas en la tensión de celda no superan los 2 mV/min.).

La figura 4-73 muestra la evolución de la temperatura de la batería durante el proceso de carga, que sigue un desarrollo similar a los casos anteriores donde la temperatura de funcionamiento era más alta (ver figura 4-73). La conclusión es que el incremento de temperatura que se produce con respecto a la temperatura de inicio de la carga es similar en todos los casos donde la carga finaliza cuando se detecta la presencia de hidrógeno (aproximadamente 23 °C).

En estas condiciones de ensayo, se puede observar que en la parte final de la carga y antes de que ésta termine a consecuencia de la detección de hidrógeno, se produce un ligero cambio en la pendiente de la temperatura pasando de 0,1 °C/min. a 0,2 °C/min. No obstante, debe tenerse cuidado con el empleo de este cambio para finalizar la carga ya que puede quedar enmascarado por otros fenómenos y provocar la sobrecarga de la batería y la pérdida de hidrógeno del interior de la misma.

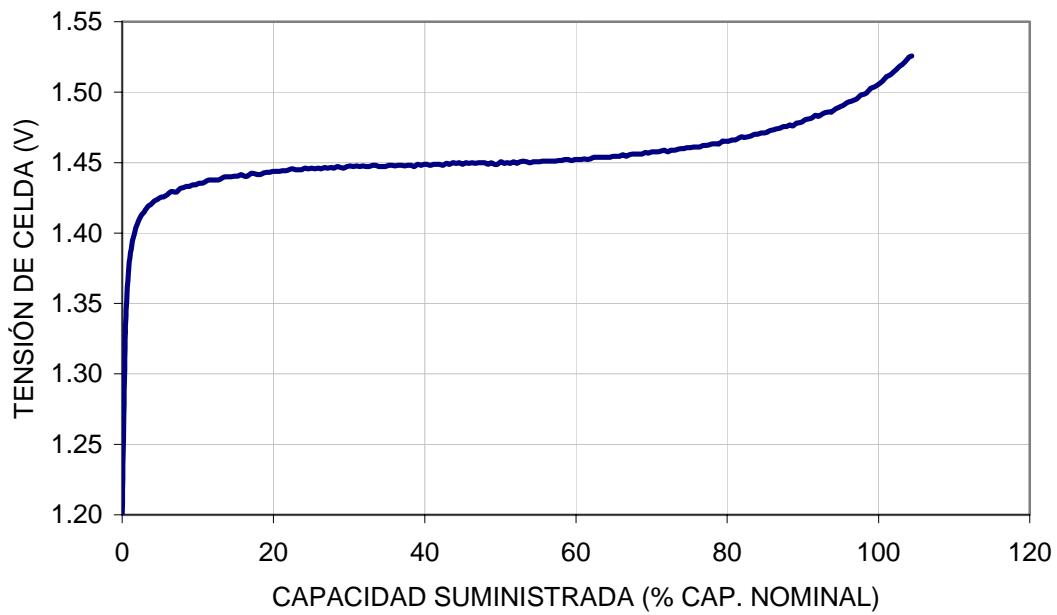


Figura 4-72. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C.

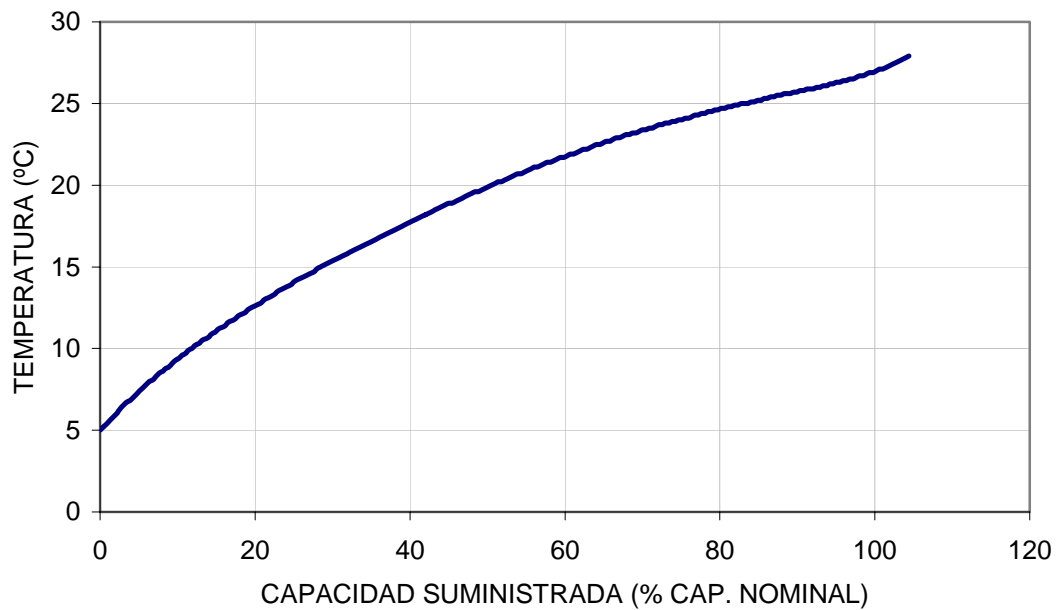


Figura 4-73. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga 0,5C y temperatura ambiente de 5 °C.

En la tabla 4-22 se puede comprobar que la capacidad descargada es de prácticamente el 100 por ciento de la capacidad nominal de la batería ya que durante la carga se le suministra aproximadamente un 104 por ciento de su capacidad nominal. La aceptación de carga es de un 96 por ciento.

La eficiencia energética decrece aproximadamente un 2 ó un 3 por ciento con respecto a las pruebas de carga a una razón de 0,5C y temperaturas más altas. Esto se debe fundamentalmente a que la tensión de la batería durante la carga a temperaturas bajas, es mayor que la tensión de la batería cuando se carga a temperaturas altas. Por tanto, hay que imponer una diferencia de potencial mayor para vencer el potencial de equilibrio de los electrodos (utilizando una misma razón de carga, en este caso 0,5C). Por ejemplo, la tensión de celda promedio es de 1,455 V/celda durante la carga a 5 °C y de 1,426 V/celda cuando la carga se realiza a 23 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 0,5C Y TEMPERATURA DE 5 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	123
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	104,4
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	100,3
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,1
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	82,8
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	23

Tabla 4-22. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 0,5C y temperatura de 5 °C.

4.3.2.1.5 Conclusiones

El comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan con una razón de 0,5C y a temperaturas de 23 °C o inferiores es bueno y, por tanto, este régimen de carga puede aplicarse sin mayores problemas. En estas condiciones se logra la recarga de la batería en aproximadamente 2 horas, pudiendo suministrársele una capacidad muy alta (por encima del 95 por ciento de la capacidad nominal de la batería). En la figura 4-74 se puede observar la capacidad que se suministra a la batería antes de finalizar la carga por la detección de hidrógeno a diferente temperatura ambiente. La baja capacidad que es posible suministrar a la batería cuando la temperatura de la prueba es de 33 °C, se debe a que la carga finaliza cuando la temperatura supera la temperatura límite de 45 °C (no por la detección de hidrógeno, como en el resto de casos).

Teniendo en cuenta que la aceptación de carga es alta en todos los casos, la capacidad descargada es solo de entre un 3 y un 5 por ciento menor que la capacidad suministrada (ver figuras 4-75 y 4-78).

La figura 4-77 muestra la eficiencia energética obtenida para cada temperatura de funcionamiento cuando la batería se carga utilizando una razón de 0,5C. La mayor eficiencia energética se obtiene cuando la batería se carga entre 15 °C y 23 °C (cerca al 85 por ciento) y la más baja cuando la batería se carga a temperatura baja, de 5 °C.

Por tanto, se puede concluir que es factible la aplicación de una razón de carga de 0,5C en un entorno cercano a la temperatura ambiente de 23 °C o en temperaturas menores (hasta 5 °C). La pendiente de la curva de temperatura es similar, durante el desarrollo de la carga, en cada una de las temperaturas estudiadas y no supera los 0,2 °C/min. en la parte final del proceso de carga.

A medida que la temperatura ambiente crece por encima de 23 °C, la capacidad que es posible suministrar a la batería es menor (la temperatura límite se alcanza prematuramente). El uso de sistemas de refrigeración puede mejorar el comportamiento de la batería cuando la temperatura de funcionamiento es alta.

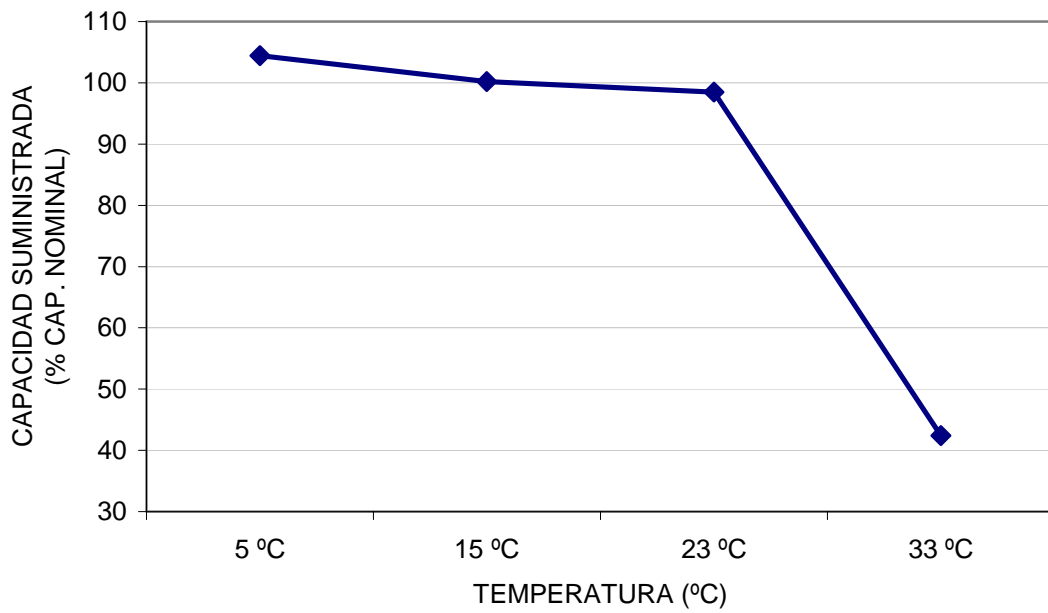


Figura 4-74. Capacidad suministrada a las baterías de Ni-MH cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C bajo diferentes condiciones de temperatura.

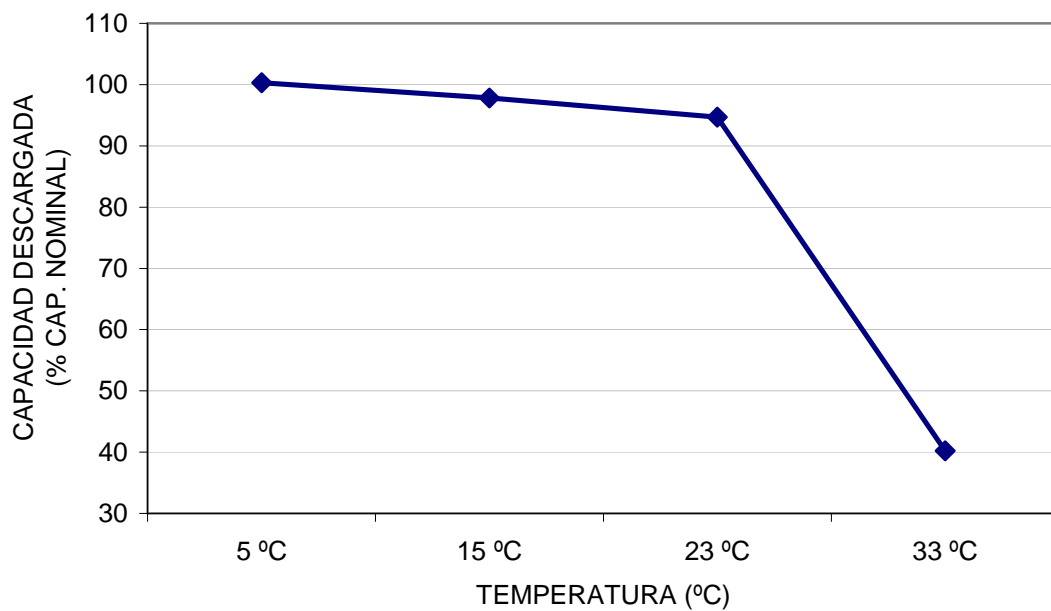


Figura 4-75. Capacidad descargada de las baterías de Ni-MH cuando se utiliza una razón de carga de 0,5C bajo diferentes condiciones de temperatura.

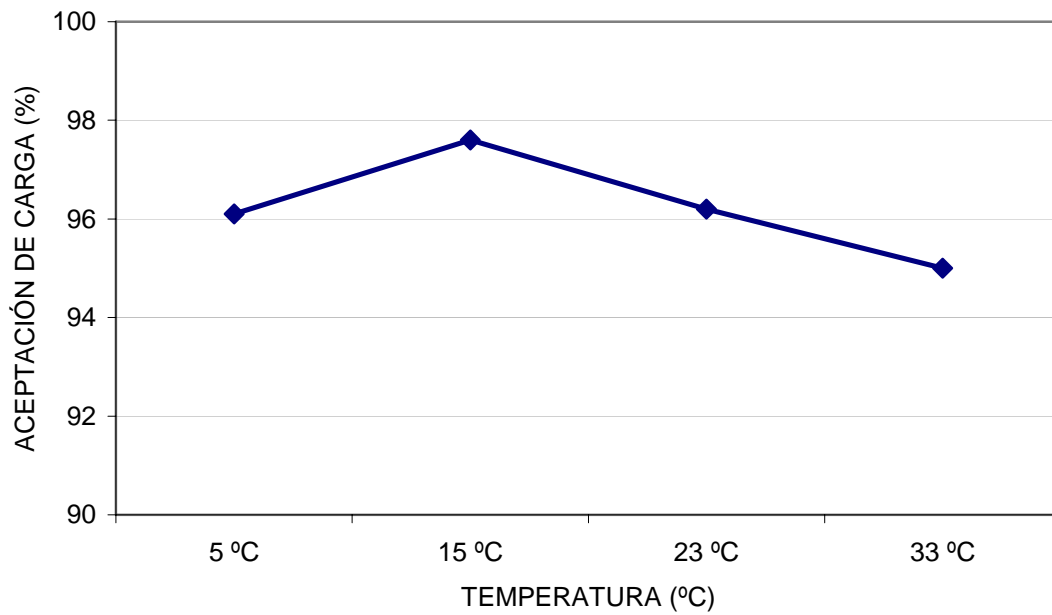


Figura 4-76. Aceptación de carga de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 0,5C y bajo diferentes condiciones de temperatura.

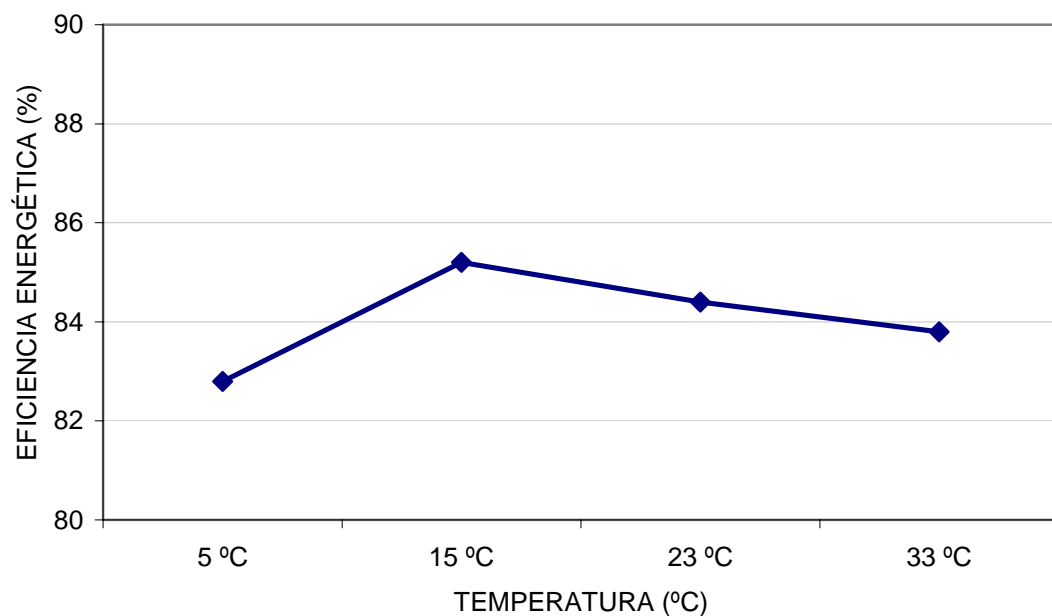


Figura 4-77. Eficiencia energética de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 0,5C y bajo diferentes condiciones de temperatura.

4.3.2.2 Comportamiento a distintas temperaturas y razón de carga de 1,0C

Continuando con el análisis del comportamiento de las baterías de Ni-MH bajo diferentes temperaturas se procede a utilizar una razón de carga de 1,0C. Teniendo en cuenta el comportamiento observado en la sección anterior, es previsible que el aumento de la temperatura sea aún mayor y que el comportamiento de la batería sea peor que el exhibido cuando la razón de carga aplicada fue de 0,5C.

4.3.2.2.1 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C

El comportamiento de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a una razón de 1,0C y a temperatura de 23 °C sirve de base para los análisis del comportamiento de las baterías a otras temperaturas de funcionamiento diferentes. Este comportamiento se analizó en la sección 4.3.1.4 de este capítulo.

La evolución de la tensión de celda, de la temperatura y el resumen de los principales índices de comportamiento (cuando el proceso de carga finaliza por exceder la temperatura límite de funcionamiento) se pueden ver en las figuras 4-60, 4-61 y en la tabla 4-19.

4.3.2.2.2 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 33 °C

La carga de las baterías de Ni-MH utilizando una razón de 1,0C no brinda la posibilidad de alcanzar un estado de carga avanzado cuando la batería funciona bajo una temperatura alta o incluso una temperatura ambiente estándar (23 °C). En las pruebas realizadas a temperatura ambiente de 33 °C se puede comprobar que en un breve periodo de tiempo (aproximadamente 10 minutos) la temperatura se incrementa suficientemente como para superar el límite de funcionamiento normal. Esto imposibilita que la batería reciba suficiente energía para alcanzar un porcentaje alto de su capacidad nominal.

En la figura 4-78 se muestra la evolución de la tensión de celda de las baterías de Ni-MH cuando se aplica una razón de carga de 1,0C y a temperatura de 33 °C.

Como se puede apreciar, la curva de tensión prácticamente no alcanza su parte más plana ya que el proceso de carga finaliza después de que se supera la temperatura límite. En este caso, la carga finaliza antes de que la batería reciba un 20 por ciento de su capacidad nominal. La evolución de la tensión no se puede emplear en estos casos para detectar el instante de finalización de la carga y solo es posible hacerlo estableciendo un límite de temperatura.

La pendiente de la temperatura es elevada cuando se aplica la razón de carga de 1,0C, al comienzo de la carga es de 1,5 °C/min. y disminuye hasta los 0,6 – 0,5 °C/min. en la parte final del proceso de carga. Esta pendiente es alta comparada con la de la temperatura cuando se aplica una razón de carga de 0,5C (0,4 °C/min. al inicio de la carga y entre 0,1 – 0,2 °C/min. en la parte final del proceso de carga).

El fuerte incremento de la temperatura que se produce cuando las baterías de Ni-MH se someten a una razón de 1,0C se puede observar en la figura 4-79. En la tabla 4-23 se muestra un incremento de la temperatura de solo 12 °C; este incremento es el que se produce sobre la temperatura de comienzo de la carga (33 °C) cuando la carga finaliza porque la temperatura alcanza los 45 °C. Si el proceso de carga no se detiene, este aumento de temperatura es mucho mayor (por encima de los 30 °C) y la temperatura final de la batería se aproxima a los 65 °C. El funcionamiento por encima de 45 °C debe evitarse para no dañar la batería y acortar su vida útil.

En la tabla resumen 4-23 se observa un descenso importante de la aceptación de carga (no supera el 88 por ciento) y de la eficiencia energética (no rebasa el 74 por ciento). Una de las causas principales de estos valores tan bajos es la baja eficiencia que tiene el proceso de carga en los instantes iniciales. Una parte de las reacciones químicas que se producen al inicio de la carga y de la energía que se consume, está relacionada con procesos químicos no reversibles (energía que no se recupera durante el siguiente proceso de descarga de la batería). Esta energía es necesaria para proporcionar la polarización de los electrodos y, por tanto, permitir la circulación de la corriente (desviación del potencial de equilibrio de los electrodos). El porcentaje del tiempo de carga total durante el cual ocurren estas reacciones es alto debido a que la carga ha finalizado anticipadamente por haberse alcanzado la temperatura límite.

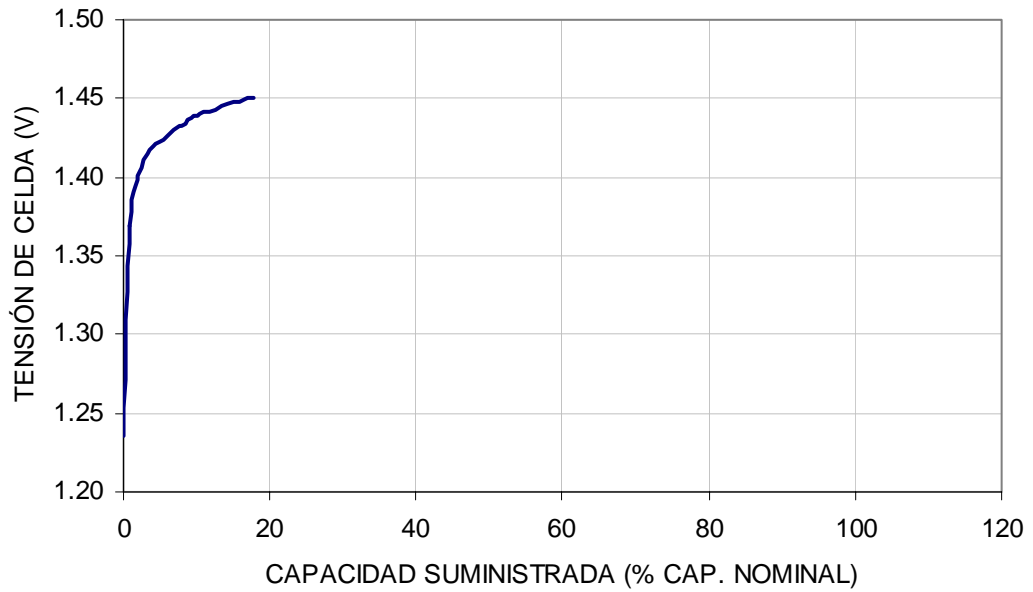


Figura 4-78. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 33 °C.

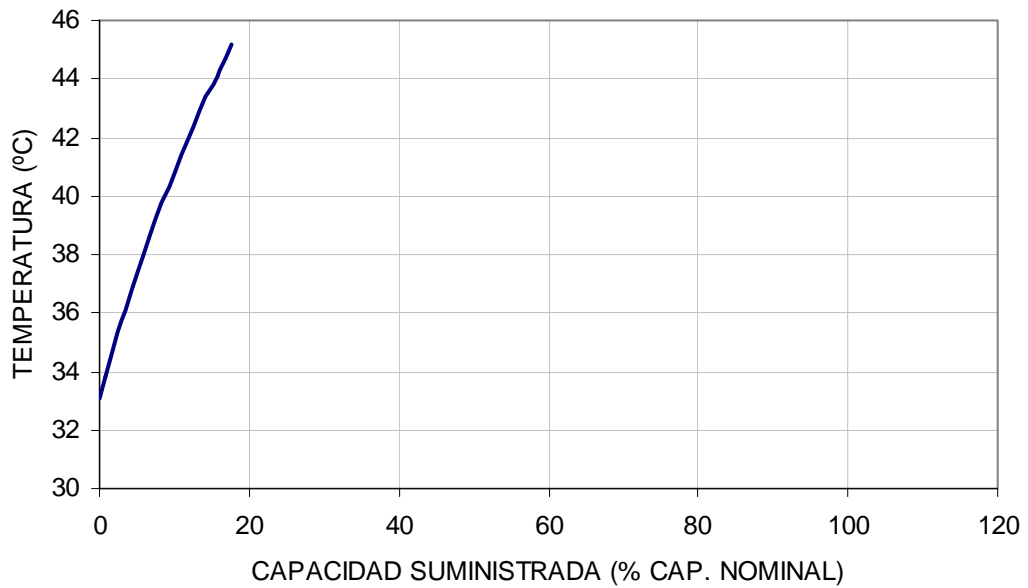


Figura 4-79. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 33 °C.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 33 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	11
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	17,7
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	15,4
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	87,4
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	73,8
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	12

Tabla 4-23. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 1,0C y temperatura de 33 °C.

4.3.2.2.3 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C

Es evidente que a medida que la carga se realiza a una temperatura más baja, existen mayores posibilidades de poder suministrar una mayor cantidad de energía a la batería antes de rebasar el límite de temperatura de funcionamiento.

Aún así, cuando se realiza la carga de las baterías de Ni-MH a una razón de 1,0C y a temperatura ambiente de 15 °C, tampoco se puede lograr la carga completa de la batería. En la figura 4-80 se muestra la evolución de la tensión de celda durante la carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 15 °C. La curva de la tensión queda truncada por la finalización de la carga debido a la superación del límite de temperatura de funcionamiento. Nuevamente, la temperatura es la variable que determina la finalización del proceso de carga. La curva de temperatura que se muestra en la figura 4-81 exhibe una pendiente inicial de 1,5 °C/min. (durante los primeros instantes de la carga) disminuyendo en la parte final del proceso de carga hasta los 0,6 °C/min. – 0,5 °C/min.

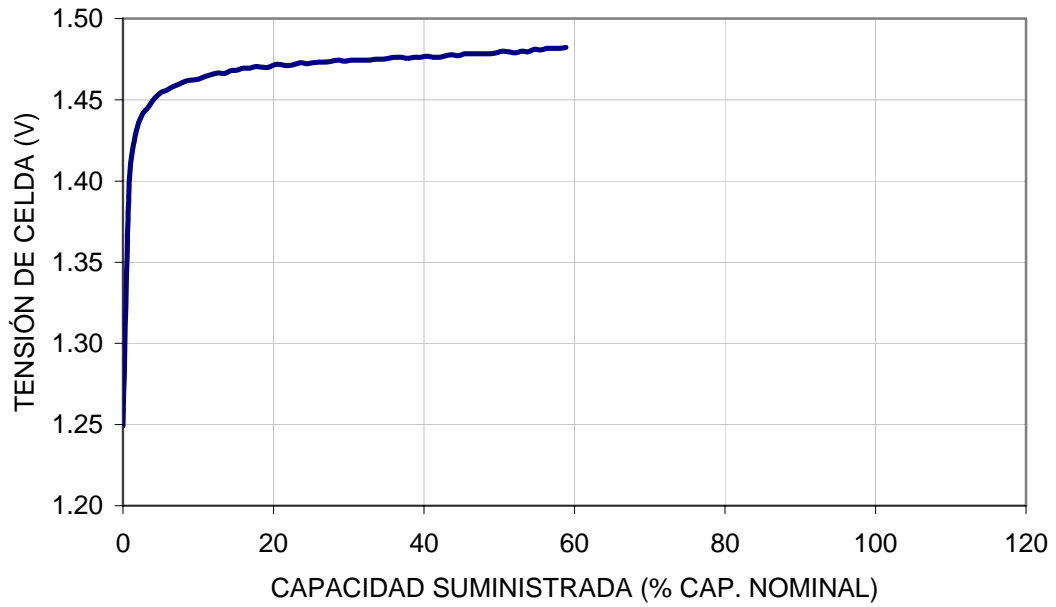


Figura 4-80. Evolución de la tensión de celda de las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

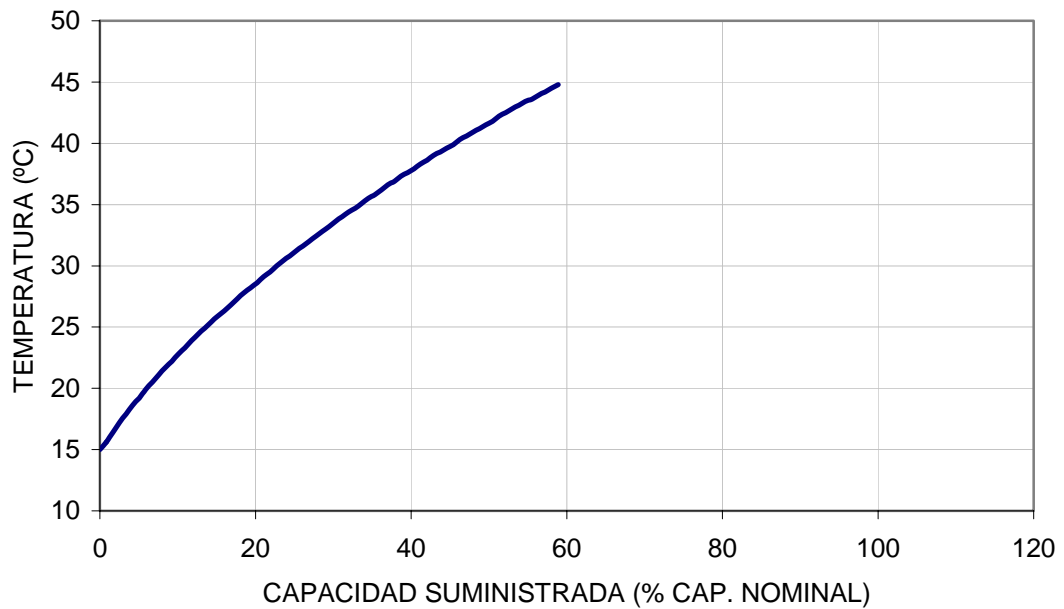


Figura 4-81. Evolución de la temperatura en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y temperatura ambiente de 15 °C.

El incremento de temperatura que se muestra en la tabla 4-24 es de 30 °C y se corresponde con el incremento máximo permitido por encima de la temperatura inicial al comienzo de la carga (15 °C). Este incremento de 30 °C hace que la temperatura alcance los 45 °C cuando todavía el porcentaje de carga suministrada es bajo (inferior al 60 por ciento de la capacidad nominal de la batería).

En las condiciones de esta prueba, la capacidad que se puede descargar de la batería es de aproximadamente el 57 por ciento de su capacidad nominal. La eficiencia energética es de aproximadamente del 83 por ciento.

Como se puede apreciar, aún comenzando la carga en un ambiente de temperatura de 15 °C (se puede considerar una temperatura baja) la carga suministrada a la batería no rebasa el 60 por ciento de su capacidad nominal. El rápido incremento de la temperatura en esta tecnología de baterías es una limitación importante cuando se necesita utilizar una razón de carga alta.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 15 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	35
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	58,9
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	57,4
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	97,5
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	82,9
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	30

Tabla 4-24. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 1,0C y temperatura de 15 °C.

4.3.2.2.4 Evolución de la tensión y la temperatura en las baterías de Ni-MH para una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 5 °C

El problema fundamental que se observa en la carga a 1,0C de las baterías de Ni-MH para temperaturas inferiores a 5 °C es el rápido incremento de la temperatura. Esto hace que el proceso de carga finalice cuando se rebasa el límite de temperatura establecido para esta tecnología de batería. En este ensayo se utiliza nuevamente una razón de 1,0C pero ahora la temperatura ambiente es menor (5 °C) por lo que el recorrido que debe seguir la temperatura para alcanzar el límite de funcionamiento es mayor.

La figura 4-82 muestra la evolución de la tensión en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C hasta que ésta finaliza debido a la detección de hidrógeno (este es el único caso donde la carga continúa hasta la detección de hidrógeno cuando se aplica una razón de carga de 1,0C).

Como se puede observar, en la parte final de la carga sí se produce una variación de la tensión que se puede tomar como una referencia de que la carga ha llegado al final de su parte más eficiente; a partir de aquí el proceso de carga debe detenerse o bien pasar a una razón de carga mucho más baja (menor que 0,1C). En el capítulo correspondiente a métodos de carga (capítulo 5) se detallan las vías para detectar el momento idóneo de finalización de la carga, fundamentalmente cuando se utilizan razones de corriente altas.

De cualquier forma, los cambios producidos en la curva de tensión de celda son bastante pequeños (en el orden de 2 mV/min. – 3 mV/min. al final de la carga). Cuando la carga se detiene anticipadamente por superarse los límites de temperatura, estas variaciones no aparecen en la curva de tensión (ver figuras 4-60, 4-78 y 4-80).

La figura 4-83 muestra la evolución de la temperatura durante la carga de las baterías partiendo de la temperatura ambiente de 5 °C. Aún cuando el proceso de carga finaliza después de la detección de hidrógeno, no se observa un cambio significativo de la temperatura al final de la carga (como en los casos donde se utilizan razones de carga más bajas, ver figuras 4-53 y 4-55).

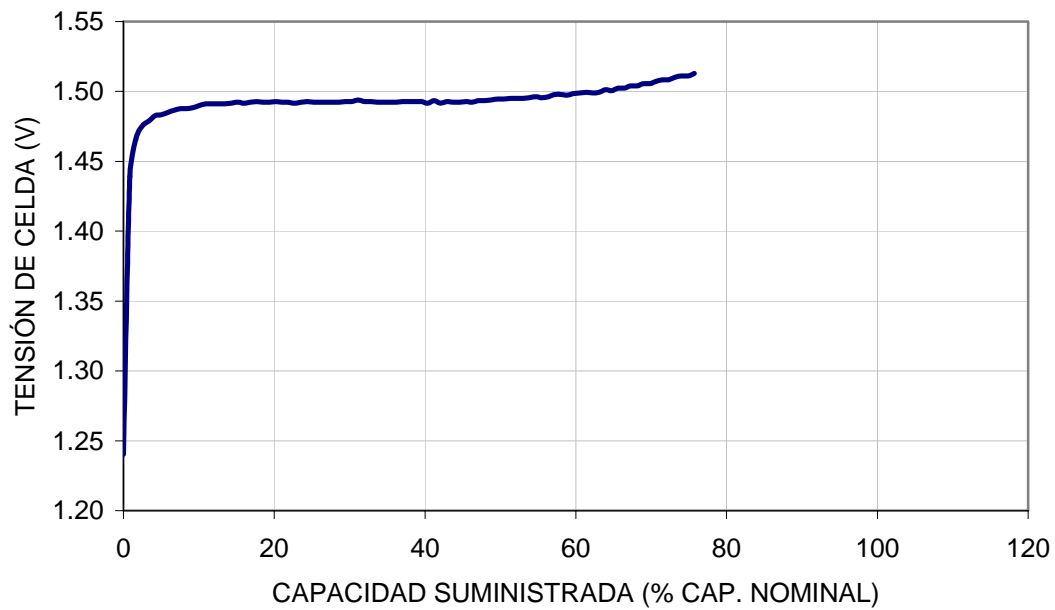


Figura 4-82. Evolución de la tensión de celda en las baterías de Ni-MH durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 5 °C.

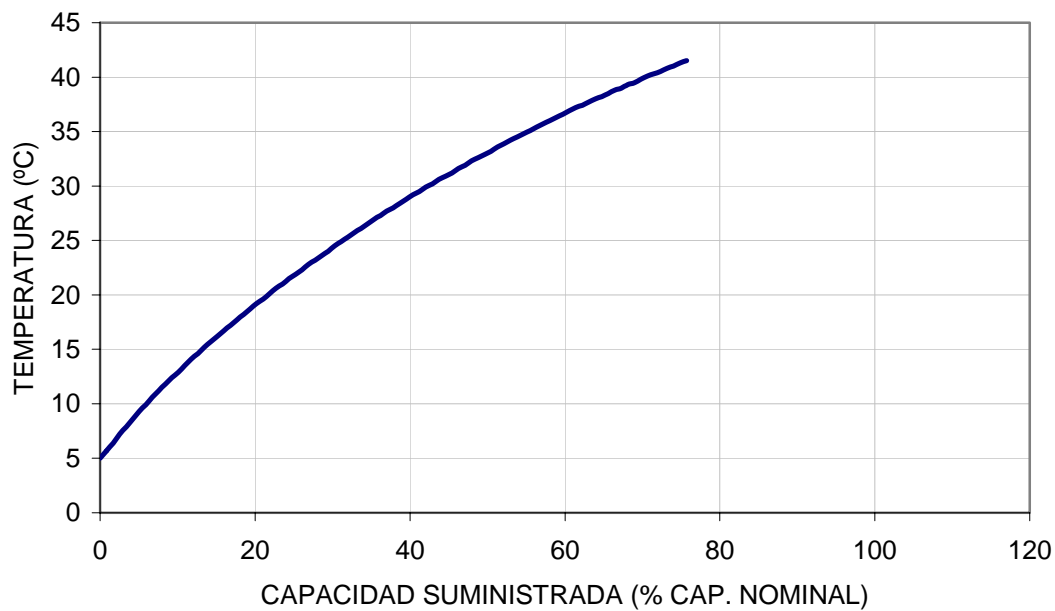


Figura 4-83. Evolución de la temperatura durante la carga de las baterías de Ni-MH con una razón de carga de 1,0C y a temperatura ambiente de 5 °C.

La velocidad de cambio de la temperatura coincide con la que se obtiene cada vez que se utiliza la razón de carga de 1,0C. Al inicio de la carga, el incremento de temperatura es de 1,5 °C/min. y va descendiendo hasta el final de la carga (0,5 – 0,4 °C/min.).

En la tabla 4-25 se muestran los resultados obtenidos durante los ciclos de carga-descarga realizados con la razón de carga de 1,0C y temperatura de 5 °C. Como se puede apreciar, el incremento de la temperatura sobre la temperatura inicial de la carga es de 37 °C. La temperatura final no alcanza el límite máximo establecido y el proceso de carga concluye cuando se detecta hidrógeno.

A pesar de que el tiempo de carga es de aproximadamente 45 minutos (para esta prueba) no se logra recargar una capacidad adecuada. La capacidad que se suministra a la batería es inferior al 76 por ciento de su capacidad nominal.

RAZÓN DE CARGA DE 1,0C Y TEMPERATURA DE 5 °C	
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	45
CAPACIDAD SUMINISTRADA (% CAP. NOMINAL)	75,7
CAPACIDAD DESCARGADA (% CAP. NOMINAL)	72,8
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,2
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	80,6
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	36,5

Tabla 4-25. Resumen de las características de funcionamiento de las baterías de Ni-MH. Razón de carga de 1,0C y temperatura de 5 °C.

La aceptación de carga es relativamente alta (96 por ciento) por lo que la capacidad descargada se aproxima a la capacidad que se le suministra a la batería durante la carga. En este caso, la capacidad que es posible descargar de la batería es de

aproximadamente un 73 por ciento, un valor muy bajo de capacidad disponible después de hacer una recarga de la batería (se desaprovecha más de un 25 por ciento de la capacidad nominal).

La eficiencia energética, a pesar de completarse la carga hasta la detección de hidrógeno, es más baja que cuando la temperatura ambiente se establece en 15 °C y 23 °C (finalización por temperatura límite).

4.3.2.2.5 Conclusiones

Como se ha podido observar, las baterías de Ni-MH no tienen una respuesta adecuada a la carga cuando se utiliza una razón de 1,0C, a diferencia de las baterías de Ni-Cd que también se estudiaron en este capítulo.

En la gráfica 4-84 se observa que la capacidad que puede suministrarse a la batería durante la carga a 1,0C va disminuyendo a medida que la temperatura del medio donde se desarrolla la carga aumenta. Esto se debe fundamentalmente a que no se permite el funcionamiento de la batería por encima de la temperatura límite (45 °C) con el fin de preservar el número de ciclos de carga-descarga de vida útil de las baterías.

En ninguno de los casos analizados (ver figura 4-84), la capacidad suministrada a la batería supera el 80 por ciento. El aprovechamiento de la capacidad de la batería en estas condiciones es muy bajo y tiene que analizarse muy bien la conveniencia o no de aplicar esta razón de carga. Este comportamiento puede mejorar si se utilizan medios para evacuar el calor generado en estas baterías durante la carga.

La capacidad descargada, que es una consecuencia directa de la capacidad que se suministra a la batería durante la carga, no supera el 73 por ciento de la capacidad nominal. Éste es un porcentaje de carga muy bajo para considerar aceptable el comportamiento de la batería a una razón de carga de 1,0C.

En la figura 4-86 se muestra la aceptación de carga conseguida durante los ensayos realizados a 1,0C y diferentes temperaturas de funcionamiento. Para temperaturas altas (33 °C) la aceptación de carga es baja (87,4 por ciento) si se compara con la

obtenida para temperaturas entre 5 °C y 23 °C (entre un 96 y un 97 por ciento aproximadamente).

El valor de la aceptación de carga es un valor promedio de la eficiencia de todo el proceso de carga. La eficiencia en el inicio de la carga es baja y se incrementa posteriormente (alcanza casi un 100 por ciento) hasta llegar a la parte final donde se produce la sobrecarga y disminuye de nuevo (ver figura 4-1). En el caso de funcionamiento a 33 °C, el tiempo que tarda el sistema en finalizar el proceso de carga es muy pequeño y, por tanto, comparable con la duración de la parte ineficiente del inicio de la carga. De ahí que la aceptación de carga de todo el proceso se haya visto reducida en casi un 10 por ciento con respecto al funcionamiento a otras temperaturas.

La eficiencia energética sigue una evolución similar a la aceptación de carga en estas condiciones de ensayo (razón de carga de 1,0C a diferentes temperaturas). La gráfica 4-87 muestra la evolución de esta variable en las pruebas realizadas.

El máximo incremento de la temperatura se observa cuando la batería se carga a temperatura ambiente de 5 °C (el incremento de temperatura es de aproximadamente 37 °C). Este es el único caso donde utilizando la razón de carga de 1,0C la carga finaliza por la detección de hidrógeno y no por alcanzarse el límite de temperatura. En el resto de casos (15 °C, 23 °C y 33 °C) el incremento de temperatura es el permitido hasta que se alcanza la temperatura límite (partiendo de cada temperatura de funcionamiento).

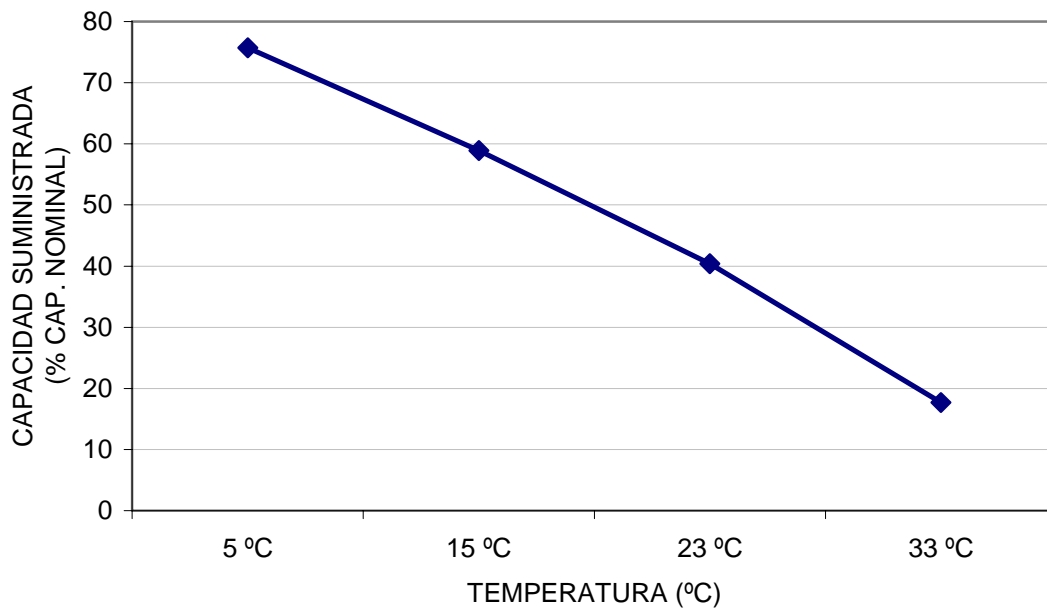


Figura 4-84. Capacidad suministrada a las baterías de Ni-MH cuando se utiliza una razón de carga de 1,0C bajo diferentes condiciones de temperatura.

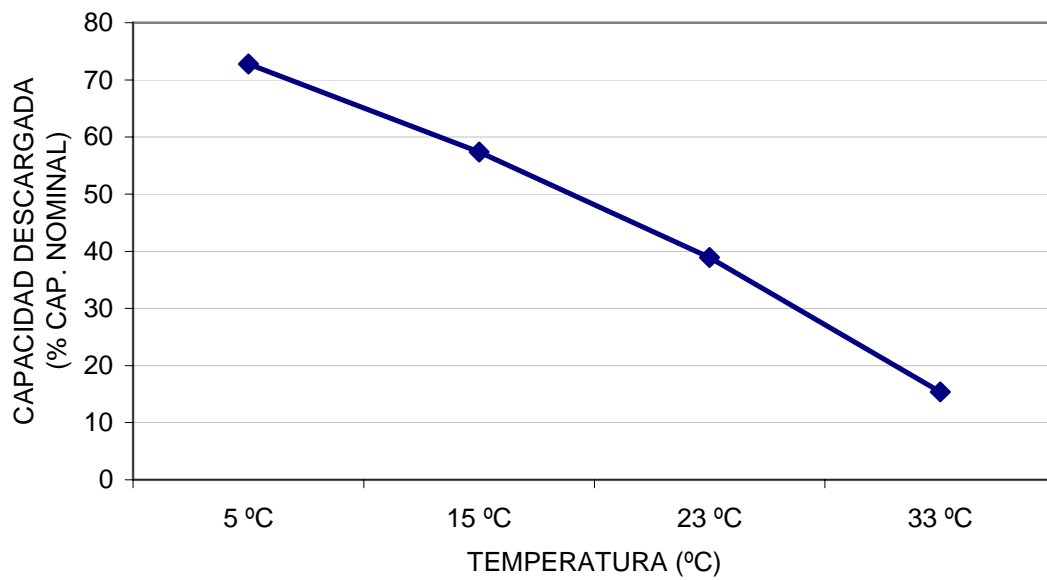


Figura 4-85. Capacidad descargada de las baterías de Ni-MH cuando se utiliza una razón de carga de 1,0C bajo diferentes condiciones de temperatura.

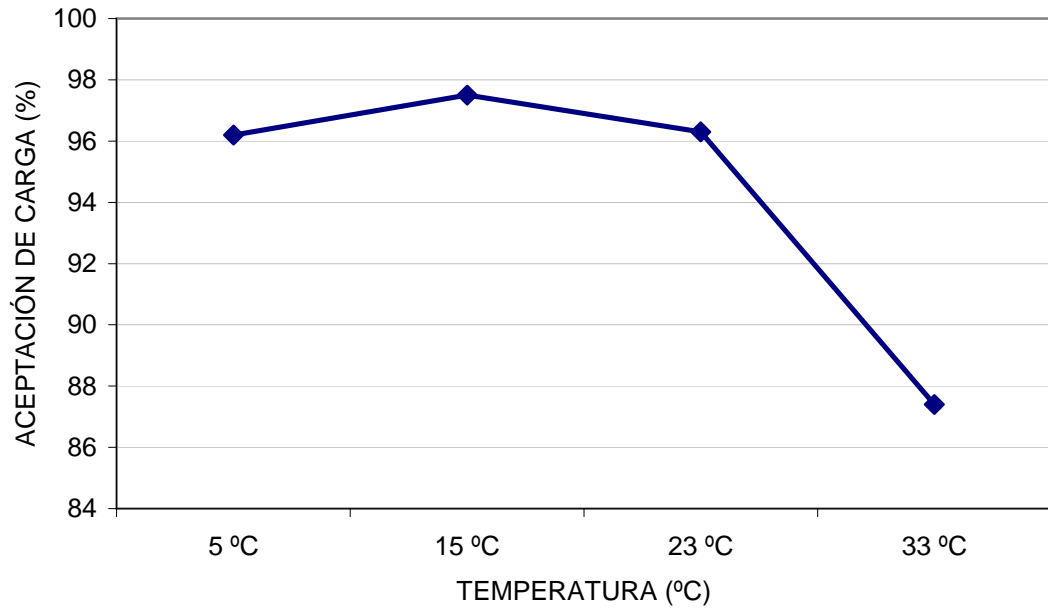


Figura 4-86. Aceptación de carga de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 1,0C y bajo diferentes condiciones de temperatura.

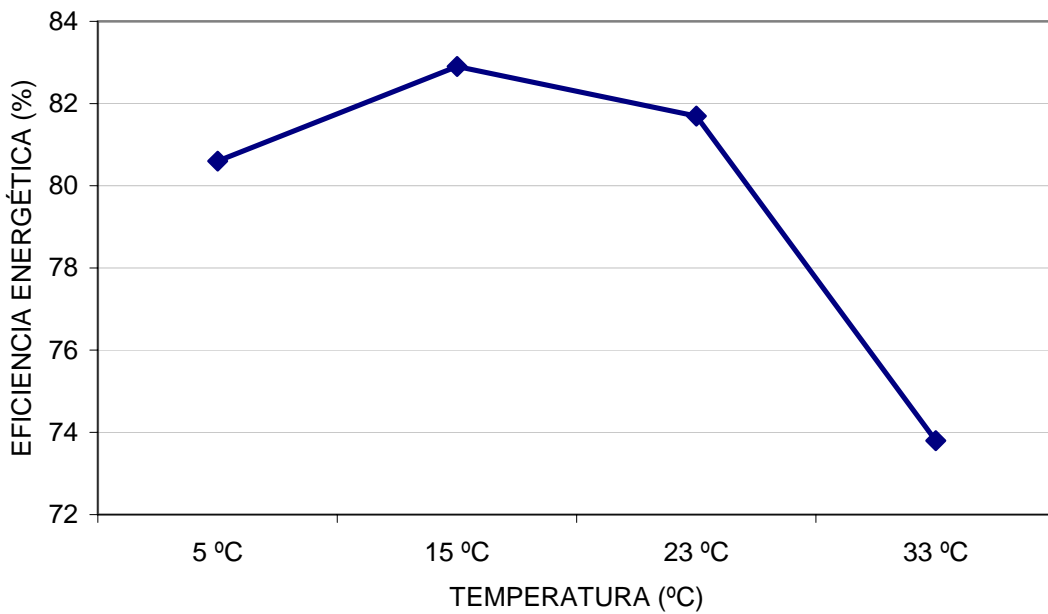


Figura 4-87. Eficiencia energética de las baterías de Ni-MH cuando se cargan a 1,0C y bajo diferentes condiciones de temperatura.

La utilización de una razón de carga de 1,0C no se considera adecuada en baterías de Ni-MH. El rápido incremento de la temperatura que este régimen de carga produce no permite concluir la carga en unas condiciones satisfactorias. Incluso, cuando la carga no fue finalizada por superar el límite de temperatura de funcionamiento (la continuó hasta que finalizó por detección de hidrógeno), el estado final de carga alcanzado por la batería fue bajo (inferior al 73 por ciento de la capacidad nominal de la batería).

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS BATERÍAS DE NI-CD Y NI-MH DURANTE LA APLICACIÓN DE CARGA RÁPIDA

En este apartado se analizan las principales variables involucradas en el proceso de carga y se estudian cuales de ellas aportan mayores elementos de juicio para la toma de decisiones en cuanto a la razón de carga a elegir y el instante de finalización de la carga rápida más adecuado. Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta son:

- En baterías de Ni-Cd, la temperatura de la batería no supera la temperatura de 45 °C aún en las peores condiciones de funcionamiento probadas, es decir temperatura ambiente de 33 °C y razón de carga de 2C.

Hay que destacar que las baterías pueden funcionar a temperaturas superiores a los 33° C con una carga de 2C, siendo necesario cortar la carga rápida cuando la temperatura supera los 45 °C. La capacidad que se puede descargar en estas condiciones es más baja y por ese motivo es importante plantearse la conveniencia o no de hacer una carga rápida a 2C para temperaturas ambiente altas. Además, cuando se utilizan razones de carga de 2,0C se producen deformaciones de la tensión de la batería, fundamentalmente al inicio de la carga y en mayor grado cuando la temperatura ambiente durante la carga es de 5 °C.

En las baterías de Ni-MH es injustificable hacer una carga rápida a más de 0,5C si la temperatura es alta. Incluso a 0,5C y 33 °C es importante analizar si es o no conveniente la realización de la carga.

- En las baterías de Ni-MH tanto para temperaturas de funcionamiento elevadas como para razones de carga altas se producen aumentos de temperatura que obligan a detener el proceso de carga aún cuando no se detecta hidrógeno. Dado el carácter exotérmico de las reacciones de carga en esta tecnología de batería se producen aumentos de la temperatura que ponen en peligro la integridad de los elementos que componen las baterías y la carga debe detenerse.

Por otro lado, los porcentajes de capacidad sobre la capacidad nominal de la batería que pueden ser descargados cuando se aumentan las razones de carga por encima de 0,5 son muy bajos.

Por tanto, no se recomienda la carga rápida de las baterías de Ni-MH por encima de 0,5C a temperaturas superiores a 23 °C.

Las tablas 4-26, 4-27, 4-28, 4-29, 4-30, 4-31 y 4-32 muestran de forma comparativa los principales índices de comportamiento de las baterías de Ni-Cd y las tablas 4-33,4-34,4-35,4-36,4-37,4-38,4-39 los correspondientes a las baterías de Ni-MH.

- **Tecnología de Ni-Cd**

RAZONES DE CARGA A 23°C

ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO	0,1C	0,2C	0,5C	1,0C	2,0C
CAPACIDAD DESCARGADA (%CAP. NOMINAL)	100,0	97,5	93,5	91,5	85,7
TENSIÓN MÁXIMA DE CELDA (V)	1,681	1,716	1,760	1,827	1,844
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	96,7	97,2	97,5	97,1	96,9
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	85,3	84,4	82,2	79,4	74,5
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	0,0	0,0	2,0	5,0	6,0
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	609,0	296,0	113,0	55,0	26,1

Tabla 4-26. Resumen de índices de comportamiento de baterías de Ni-Cd para diferentes razones de carga y temperatura de 23 °C.

CAPACIDAD DESCARGADA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (% CAP. NOMINAL)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	83,0	89,6	79,6
15 °C	92,0	88,8	82,3
23 °C	93,5	91,5	85,7
33 °C	93,2	87,7	85,5

Tabla 4-27. Capacidad descargada como porcentaje de la capacidad nominal para razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

TENSIÓN MÁXIMA DE CELDA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (V)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	1,745	1,867	1,864
15 °C	1,761	1,836	1,852
23 °C	1,760	1,827	1,844
33 °C	1,722	1,755	1,832

Tabla 4-28. Tensión máxima de celda para razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

ACEPTACIÓN DE CARGA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (%)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	98,3	97,8	93,6
15 °C	97,6	97,8	97,1
23 °C	97,5	97,1	96,9
33 °C	96,3	96,6	94,3

Tabla 4-29. Aceptación de carga para razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (%)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	79,8	77,3	69,2
15 °C	81,0	78,6	76,0
23 °C	82,2	79,4	74,5
33 °C	81,4	79,2	73,0

Tabla 4-30. Eficiencia energética cuando la batería se carga con razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

INCREMENTO DE TEMPERATURA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (°C)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	4,0	6,0	10,0
15 °C	3,5	5,5	7,0
23 °C	2,0	5,0	6,0
33 °C	2,0	4,0	5,0

Tabla 4-31. Incremento de la temperatura sobre la temperatura inicial de la batería para razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

TIEMPO DE CARGA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (MINUTOS)			
TEMPERATURA	0,5C	1,0C	2,0C
5 °C	99,5	54,0	25,1
15 °C	111,0	53,5	24,4
23 °C	113,0	55,0	26,1
33 °C	114,0	53,5	26,7

Tabla 4-32. Tiempo de carga para razones de carga de 0,5C, 1,0C y 2,0C a diferentes temperaturas.

- **Tecnología de Ni-MH**

RAZONES DE CARGA A 23°C					
ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO	0,1C	0,2C	0,5C	1,0C	
				H*	T**
CAPACIDAD DESCARGADA (%CAP. NOMINAL)	100,0	99,6	94,4	64,2	38,9
TENSIÓN MÁXIMA DE CELDA (V)	1,467	1,476	1,476	1,484	1,470
ACEPTACIÓN DE CARGA (%)	91,5	94,1	96,2	94,2	96,3
EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	87,3	84,1	84,5	80,1	82,0
INCREMENTO DE TEMPERATURA (°C)	9,0	11,0	21,0	32,0	23,0
TIEMPO DE CARGA (MINUTOS)	610,0	313,0	116,0	41,0	24,0

* Finalización de la carga por detección de hidrógeno.

**Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-33. Resumen de índices de comportamiento de baterías de Ni-MH para diferentes razones de carga a temperatura de 23 °C.

CAPACIDAD DESCARGADA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (% CAP. NOMINAL)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	100,3	72,8
15 °C	97,8	57,4 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	94,4	64,2
(CORTE POR T) 23 °C	-	38,9 *
33 °C	40,2 *	15,4 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-34. Capacidad descargada como porcentaje de la capacidad nominal para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

TENSIÓN MÁXIMA DE CELDA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (V)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	1,526	1,513
15 °C	1,495	1,482 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	1,476	1,484
(CORTE POR T) 23 °C	-	1,470 *
33 °C	1,427 *	1,450 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-35. Tensión máxima de celda para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

ACEPTACIÓN DE CARGA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (%)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	96,1	96,2
15 °C	97,6	97,5 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	96,2	94,2
(CORTE POR T) 23 °C	-	96,3 *
33 °C	95,0 *	87,4 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-36. Aceptación de carga para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (%)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	82,8	80,6
15 °C	85,2	82,9 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	84,5	80,1
(CORTE POR T) 23 °C	-	82,0 *
33 °C	83,8 *	73,8 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-37. Eficiencia energética para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

INCREMENTO DE TEMPERATURA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (°C)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	23,0	36,5
15 °C	22,0	30,0 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	21,0	32,0
(CORTE POR T) 23 °C	-	23,0 *
33 °C	13 *	12,0 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-38. Incremento de la temperatura sobre la temperatura inicial de la batería para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

TIEMPO DE CARGA PARA DIFERENTES RAZONES DE CARGA (MINUTOS)		
TEMPERATURA	0,5C	1,0C
5 °C	123,0	45,0
15 °C	118,0	35,0 *
(CORTE POR H₂) 23 °C	116,0	41,0
(CORTE POR T) 23 °C	-	24,0 *
33 °C	50,0 *	11,0 *

*Finalización de la carga por límite de temperatura (45 °C).

Tabla 4-39. Tiempo de carga para razones de carga de 0,5C y 1,0C a diferentes temperaturas.

CAPÍTULO

5

**MÉTODOS DE CARGA Y CRITERIOS DE
DETECCIÓN DE FIN DE CARGA UTILIZADOS EN
BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH**

5 MÉTODOS DE CARGA Y CRITERIOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA UTILIZADOS EN BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH

El perfil de uso de la batería junto con criterios técnico-económicos asociados a la aplicación, determinan en muchos casos el método de carga a utilizar. Sin embargo, la forma en que se realiza la carga de una batería afecta en gran medida a su capacidad para entregar energía en las condiciones que fija la aplicación. Por tanto, se debe alcanzar un compromiso entre las características de la batería, las condiciones de uso impuestas por la aplicación y el método de carga más adecuado para su óptimo aprovechamiento.

5.1 MÉTODOS DE CARGA

En un gran número de aplicaciones es conveniente disponer de un método de carga rápida eficiente y fiable que no provoque daños que acorten la vida útil de la batería [69] [89]. La reducción del tiempo de carga hace posible el empleo de baterías de menor capacidad ya que aunque se descargan antes, existe la posibilidad de recargarlas de forma rápida, permitiendo su reutilización de forma intermitente. Además la reducción de la capacidad nominal repercute significativamente en el tamaño, peso y coste de la batería, así como en el número de baterías de reserva que se necesitan para cubrir las necesidades de la aplicación. Esto resultaría muy útil en aplicaciones de tracción como por ejemplo en vehículos eléctricos.

La carga rápida de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de baterías de media y gran capacidad se realiza utilizando una corriente de carga constante [14] [95]. En el capítulo 1 se mencionan algunas de las desventajas de realizar la carga rápida con métodos que utilizan una tensión constante. Existen determinadas variantes de estos métodos que limitan la corriente al inicio de la carga y funcionan a tensión constante a partir de una tensión prefijada. Sin embargo, tampoco resuelven todos los problemas asociados con este método de carga, fundamentalmente si se quiere acelerar el proceso de carga.

Además de la forma de la corriente de carga (corriente constante), el método de carga incluye dos elementos importantes: la magnitud de la corriente de carga (razón de carga) y el criterio de finalización de la carga.

La razón de carga que se puede aplicar a la batería depende fundamentalmente de la tecnología de la batería y de la temperatura de trabajo. En el capítulo 4 se ha realizado un estudio detallado del comportamiento de las baterías cuando se cargan con razones de carga diferentes, desde carga lenta (0,1C) hasta carga rápida (un máximo de 2,0C). Las conclusiones aportadas en ese capítulo constituyen una guía importante a la hora de seleccionar la magnitud de la corriente de carga.

Los criterios que fijan el instante de finalización de la carga tienen gran importancia, especialmente cuando se utilizan razones de carga elevadas, ya que son los encargados de indicar el instante a partir del cual la carga debe terminar o se debe reducir la razón de carga con el objetivo de evitar sobrecargas que deterioren la batería y acorten su vida útil.

Los métodos de detección de fin de carga se clasifican según la variable empleada como elemento de control:

- Métodos de detección de fin de carga basados en la medida del tiempo de carga.
- Método de detección de fin de carga basado en la medida de la capacidad cargada y descargada de la batería.
- Método de detección de fin de carga basado en el seguimiento de la presión interna de la batería.
- Métodos de detección de fin de carga basados en el seguimiento de la temperatura de la batería.
- Métodos de detección de fin de carga basados en el seguimiento de la tensión de la batería.

5.2 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN LA MEDIDA DEL TIEMPO DE CARGA

La principal ventaja de los métodos basados en el control del tiempo de carga es la sencillez ya que no requieren más que la medida del tiempo. Sin embargo, este tipo de métodos tiene serios inconvenientes ya que para su aplicación en carga rápida se debe tener un conocimiento fiable del estado de carga en que se encuentra la batería antes de iniciar la carga [3]. De lo contrario se puede someter a la batería a una sobrecarga excesiva.

Determinar con exactitud el estado de carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH es una tarea compleja y con resultados poco fiables. Por ejemplo, en el capítulo 2 se comprueba que la evolución de la tensión de vacío no permite determinar el estado de carga de las baterías debido a que se mantiene prácticamente constante durante la mayor parte del proceso de descarga. Además, la concentración del electrolito en estas tecnologías no varía durante los procesos de carga-descarga ya que no participa en las reacciones electroquímicas.

5.2.1 Control del tiempo de carga

El simple control del tiempo de carga se plantea como un método para finalizar el proceso de carga o para reducir la razón de carga aplicada después de un tiempo predeterminado. Este método proporciona a la batería en cada ciclo de carga la misma capacidad en amperios-horas, independientemente de la profundidad de la descarga anterior.

El inconveniente principal de este método es que somete a la batería a sobrecarga si el estado de inicial carga de la batería (antes de comenzar el proceso de carga) es mayor del concebido para establecer el tiempo de carga. En caso contrario, la batería quedaría cargada parcialmente. Por tanto, con este método solo se puede realizar la carga de la batería si se conoce con exactitud su estado inicial de carga.

Además, la eficiencia del proceso de carga depende de múltiples factores como el régimen de carga, la temperatura ambiente o el grado de envejecimiento de la

batería. De ahí que el tiempo calculado inicialmente para que la batería alcance la plena carga resulta inadecuado si no se corrige en función de los factores citados.

Por tanto, este método no es adecuado cuando se aplica carga rápida ya que la sobrecarga que puede producir, reduciría significativamente la vida de la batería o podría dañarla irreversiblemente.

5.2.2 Control del tiempo de carga después de una descarga total de la batería

El control del tiempo de carga es un método muy sencillo que solo se debe aplicar si se conoce con exactitud el estado de carga de la batería y una forma fiable de conocer dicho estado es descargándola completamente.

Este método se basa precisamente en realizar una descarga previa de la batería hasta su descarga total. A partir de aquí se realiza la carga aplicando una razón de carga determinada durante un tiempo establecido. Por tanto, el tiempo necesario para realizar la carga es la suma del tiempo de la descarga previa más el tiempo de la carga. La figura 5-1 muestra las dos etapas que se deben seguir cuando se aplica este método de carga.

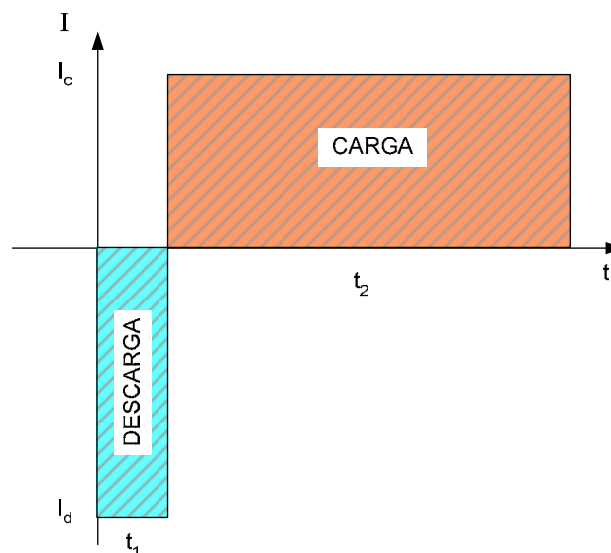


Figura 5-1. Método de carga basado en la medida del tiempo de carga con descarga total inicial de la batería.

La principal ventaja de este método radica en su sencillez, no obstante tiene serios inconvenientes cuando se utiliza para aplicar carga rápida.

Las principales desventajas de este método de carga son:

- La necesidad de realizar la descarga total de la batería introduce un retardo importante en el tiempo total de carga.
- Si se escoge una razón de descarga alta para minimizar el tiempo de la descarga previa, se produce un incremento significativo de la temperatura de la batería y por tanto, se dificulta la aplicación de carga rápida, tal y como se demuestra en el capítulo 2.
- Es necesario incluir en el diseño del cargador una etapa de potencia para realizar la descarga de la batería, lo que incrementa su complejidad y coste ya que se pueden llegar a manejar potencias altas.
- Las características de las baterías durante la carga experimentan cambios significativos cuando varía tanto la temperatura ambiente como la razón de carga aplicada. En el capítulo 4 se detalla el comportamiento de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH ante diferentes regímenes de carga a diferente temperatura ambiente. Por ejemplo, cuando la temperatura de trabajo es baja (5 °C), el instante en que la batería entra en sobrecarga se adelanta y por tanto el tiempo de carga se tiene que reducir para no sobrecargar la batería. Por tanto, habría que modificar el tiempo de carga en función de las condiciones específicas de funcionamiento, lo que complica el método.

5.3 MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADO EN LA MEDIDA DE LA CAPACIDAD CARGADA Y DESCARGADA DE LA BATERÍA

Un método que puede resultar interesante es simplemente cargar la batería con los amperios-horas que ésta necesita para alcanzar la plena carga [22]. En este caso es necesaria la medida de los amperios-hora entregados por la batería durante la

descarga y posteriormente, de los amperios-hora suministrados a la batería durante la carga.

Los principales inconvenientes de este método son:

- La acumulación de errores durante varios ciclos de carga-descarga. Por ello resulta imprescindible la ejecución de una descarga total de la batería y de una puesta a cero de la medida de amperios-hora (de forma periódica).
- La cantidad de amperios-hora o cantidad de carga aceptada por la batería antes de la sobrecarga, depende fuertemente tanto de la temperatura como de la razón de carga utilizada (ver capítulo 4).

Un aumento de la temperatura o de la razón de carga utilizada producen una sobrecarga anticipada de la batería. Por tanto, es necesario introducir factores de corrección que tengan en cuenta las desviaciones producidas por el cambio de la temperatura o de la razón de carga.

- Este método está influenciado por la forma en que se realiza la descarga de la batería.

Durante la descarga, la cantidad de energía extraída de la batería depende tanto de la temperatura como de la razón de carga utilizada y por tanto, los errores que se cometen en su estimación pueden acumularse y dar lugar a una toma de decisiones incorrectas que termine produciendo graves daños a la batería.

- El envejecimiento de la batería a lo largo de su vida útil y la razón de autodescarga, fundamentalmente durante tiempos prolongados de inactividad, hacen necesario la introducción de factores de corrección que permitan un mejor ajuste de la medida, tanto de la capacidad cargada como de la capacidad descargada.

Todos los inconvenientes descritos hacen poco fiable la utilización de este método cuando se aplican regímenes de carga elevados para acortar el tiempo de carga de la batería.

5.4 MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADO EN EL SEGUIMIENTO DE LA PRESIÓN INTERNA DE LA BATERÍA

Otra posibilidad de finalizar el proceso de carga rápida en baterías, tanto de Ni-Cd como de Ni-MH de media y gran capacidad, es a través de la medida de su presión interna. Una vez que la batería se acerca a la zona de sobrecarga la producción de gases internamente hace aumentar la presión, lo que posibilita la utilización de un sensor de presión para su medida (ver capítulo 3). La presión, a diferencia de la temperatura, es un parámetro de evolución rápida por lo que una vez rebasado determinado límite (específico para cada tipo de batería) es conveniente detener el proceso de carga rápida. Los valores límites de presión dependen de la tecnología de la batería.

Los principales inconvenientes que presenta este método de finalización de carga son:

- Su aplicación queda limitada a los diseños cerrados (baterías selladas) y es muy difícil de implementar si la batería no incorpora los sensores de presión desde su proceso de fabricación.

Solo en determinados sistemas experimentales se diseñan dispositivos para acoplar los sensores de presión a las baterías [41][43]. Además, el acoplamiento de sensores conlleva cambios en las características de la batería debido a la modificación de su estructura original.

- Su implementación resulta excesivamente cara ya que se necesita un sensor de presión por cada módulo empleado.

En determinadas aplicaciones se emplea un número elevado de módulos. Por ejemplo, en determinados vehículos eléctricos se utilizan 20 módulos de 6 V (120 V) de Ni-Cd, como los estudiados en este trabajo.

5.5 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA TEMPERATURA DE LA BATERÍA

La temperatura es un parámetro muy importante a tener en cuenta durante la aplicación de carga rápida en las baterías de media y gran capacidad. Cuando las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH se someten a carga rápida se produce un incremento de la temperatura desde el comienzo de la carga, llegando a ser más significativo cuando la batería se aproxima a la sobrecarga. En baterías de Ni-MH el aumento de la temperatura es aún mayor debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones electroquímicas de carga (ver capítulo 4). El funcionamiento a temperaturas elevadas reduce la vida útil de la batería y en condiciones extremas produce daños irreparables.

En la figura 5-2 se puede observar el incremento de la temperatura de una batería de Ni-MH cuando la carga se realiza a 0,5C y a 1,0C. Como se puede apreciar, la temperatura de la batería depende fuertemente de la razón de carga utilizada.

Existen diferentes métodos de detección de fin de carga basados en la temperatura que permiten controlar el proceso de carga en una batería. En cualquier caso, los métodos de control de carga que utilizan la temperatura como medio de control dependen fuertemente de la tecnología de batería, el tamaño, el número de celdas interconectadas, el encapsulado de la batería y fundamentalmente de la temperatura ambiente.

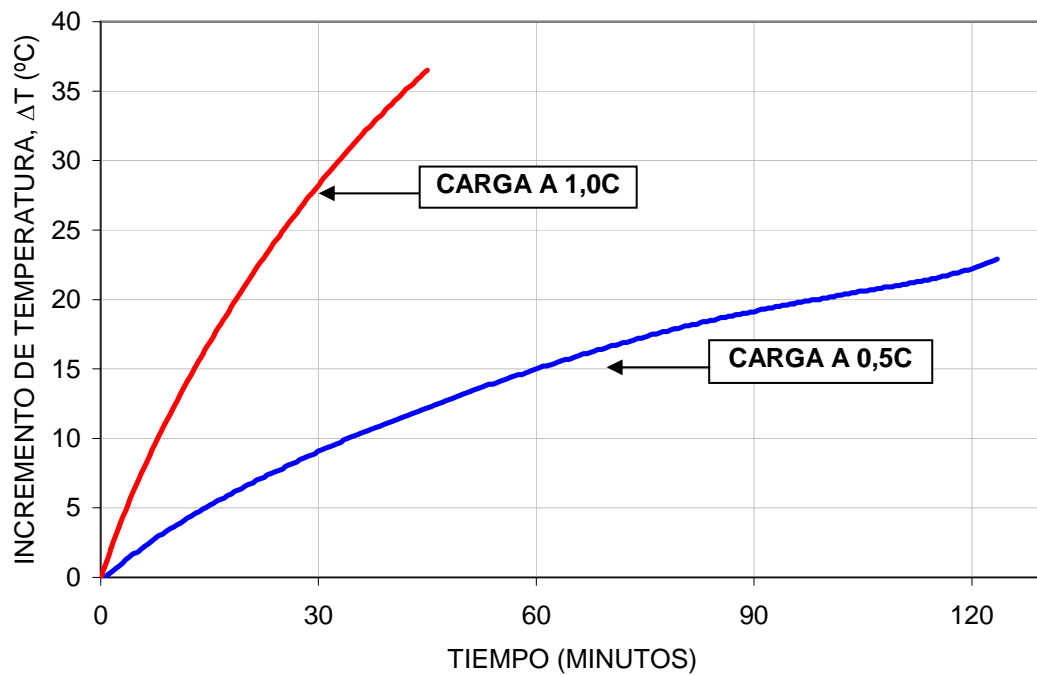


Figura 5-2. Incremento de la temperatura en una batería de Ni-MH cuando se utilizan razones de carga de 0,5C y 1,0C a 23 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura ambiente.

5.5.1 Detección de una temperatura límite en la batería

La finalización de la carga cuando se alcanza una temperatura límite de funcionamiento es uno de los métodos más sencillos que existen. El valor límite de temperatura que se utiliza para detener el proceso de carga depende fundamentalmente del tipo de batería y de sus características constructivas. En baterías de Ni-Cd y de Ni-MH la mayoría de los fabricantes fijan el valor límite de la temperatura en 45 $^{\circ}\text{C}$. Aunque estas tecnologías pueden soportar de forma puntual temperaturas de funcionamiento superiores (siempre menores de 60 $^{\circ}\text{C}$), el funcionamiento bajo estas temperaturas produce un envejecimiento acelerado (disminuye sensiblemente el número de ciclos de carga-descarga que se puede esperar de la batería).

Este método de finalización de carga tiene serios inconvenientes especialmente si se utiliza en procesos de carga rápida:

- No evita la sobrecarga de la batería.

Las reacciones de carga en las baterías de Ni-Cd son de naturaleza endotérmica y por este motivo no se produce un aumento rápido de la temperatura desde el inicio de la carga. Como se comprobó en el capítulo 4, cuando se utilizan razones de carga de 1,0C o superiores a temperatura ambiente de 23 °C la batería de Ni-Cd alcanza su estado de sobrecarga antes de que se produzca un incremento importante de la temperatura.

La figura 5-3 muestra cómo después de la detección de hidrógeno la temperatura aún no alcanza el valor límite. Por tanto, este método no impide la sobrecarga de la batería en condiciones de carga rápida.

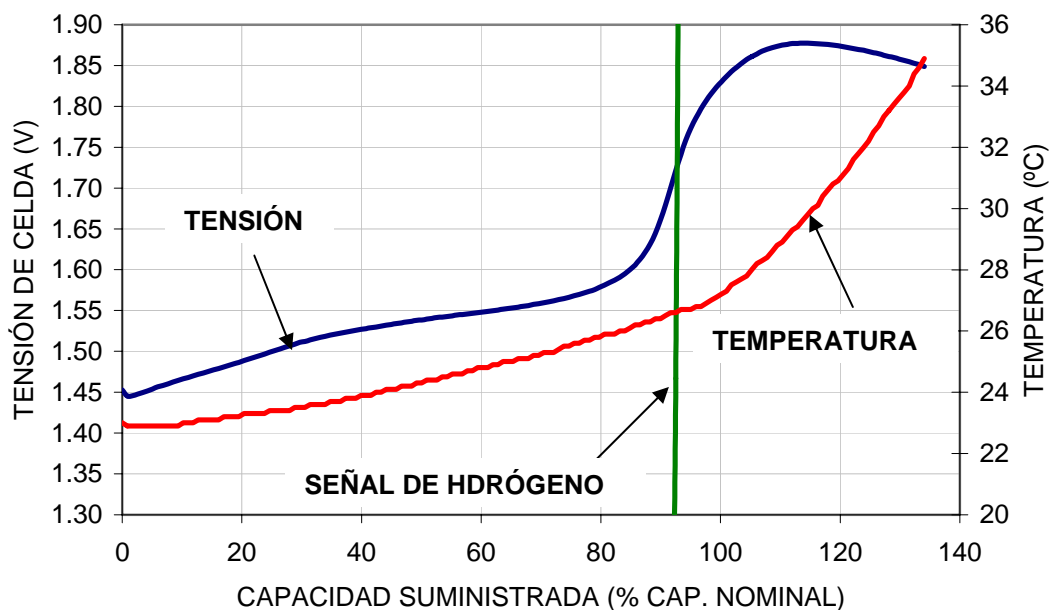


Figura 5-3. Evolución de la tensión de las baterías de Ni-Cd durante la carga a una razón de carga de 1,0C (con sobrecarga) y temperatura ambiente de 23 °C.

- No es efectivo cuando las temperaturas de funcionamiento son bajas.

Cuando la carga rápida se realiza a temperaturas bajas (por ejemplo, 5 °C) la batería entra en sobrecarga antes de que se alcance la temperatura límite de funcionamiento (ver capítulo 4). En estas condiciones, la batería funciona bajo

sobrecarga durante un tiempo prolongado antes de que se finalice la carga. En estos casos se produce una pérdida importante de agua del electrolito (en forma de oxígeno e hidrógeno) y daños físicos en la estructura de los elementos de la batería que puede llegar a ser irreversible.

La figura 5-4 muestra la evolución típica de la temperatura cuando una batería de Ni-Cd se carga a temperaturas ambiente muy diferentes (5 °C y 23 °C) y la finalización de la carga se realiza a través de la detección de una temperatura límite.

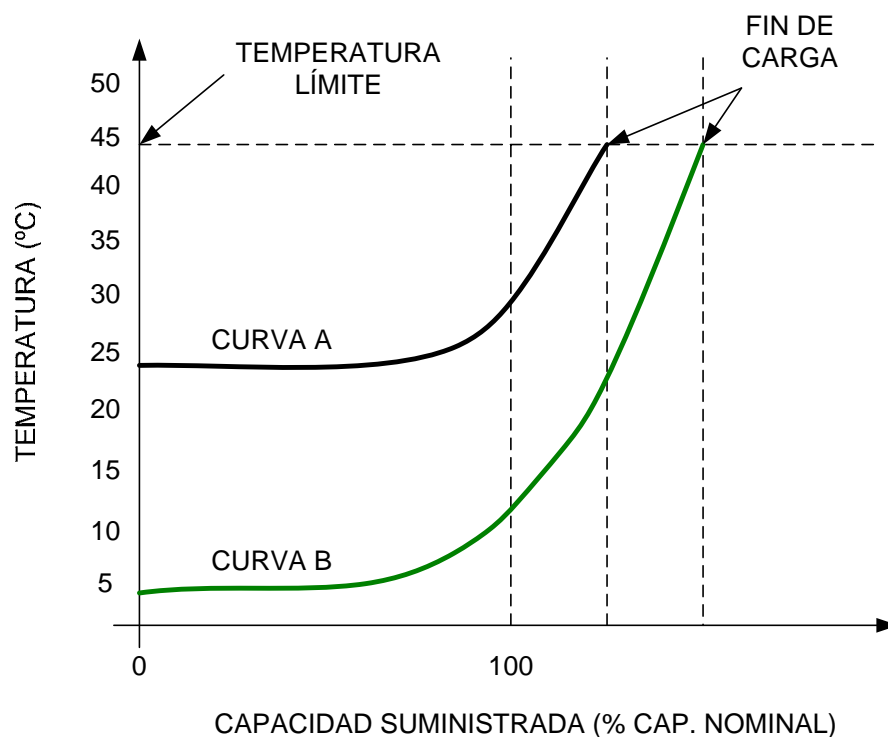


Figura 5-4. Evolución típica de la temperatura de una batería de Ni-Cd durante la carga a 23 °C (Curva A) y a 5 °C (Curva B). Finalización de carga por detección de una temperatura límite.

5.5.2 Seguimiento del incremento de la temperatura de la batería respecto a la temperatura ambiente

Una variante que resuelve parte de los problemas asociados con el método de finalización de la carga por detección de una temperatura límite, es considerar el

incremento de temperatura de la batería que se produce durante la carga respecto a la temperatura ambiente. Así, este método finaliza la carga cuando se alcanza un incremento determinado de temperatura en la batería (depende de la tecnología de la batería y de la razón de carga utilizada) respecto a la temperatura ambiente, independientemente del valor que ésta pueda tener.

Sus principales desventajas son:

- El incremento de temperatura que se produce en las baterías es mayor a medida que disminuye la temperatura ambiente.

La evolución de la temperatura en la batería varía de forma significativa cuando se utiliza una misma razón de carga a diferente temperatura ambiente (ver capítulo 4). En la figura 5-5 se muestra un ejemplo de la evolución de la temperatura en una batería de Ni-Cd cuando se utiliza una razón de carga de 1,0C a temperatura ambiente de 5 °C, 15 °C, 23 °C y 33 °C. El incremento de temperatura en la batería durante la carga es mayor a 5 °C, fundamentalmente debido al incremento de la resistencia interna de la batería.

Por tanto, este método requiere una corrección en función del valor de la temperatura ambiente.

- Para la puesta en práctica de este método se necesitan al menos dos sensores de temperatura, uno situado en la batería y otro aislado de ésta para medir la temperatura ambiente.

El proceso de carga debe finalizar cuando se alcanza la diferencia de temperatura prefijada entre la medida del sensor situado en la parte más caliente de la batería (generalmente la celda situada en el centro de la batería) y la medida del sensor que mide la temperatura ambiente.

- Este método no es efectivo cuando la batería parte de un estado avanzado de carga ya que se alcanza la sobrecarga antes de que la diferencia de temperatura prefijada se supere. En este caso la batería estaría

funcionando durante un tiempo prolongado en sobrecarga, permitiéndose la correspondiente expulsión de gases y por tanto pérdidas de electrolito y/o de material activo.

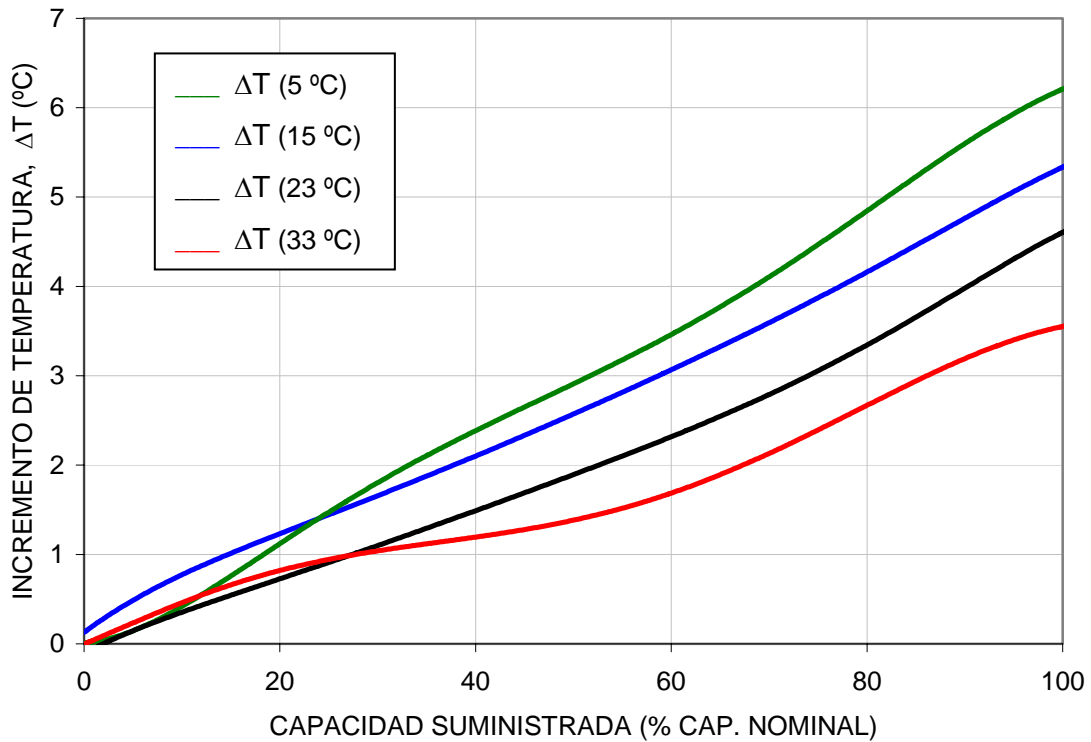


Figura 5-5. Incremento de la temperatura de una batería de Ni-Cd durante diferentes cargas a 1,0C y temperatura ambiente de 5 °C, 15 °C, 23 °C y 33 °C.

5.5.3 Control diferencial de la temperatura de la batería

Este método se basa en el mismo principio que el método de seguimiento del incremento de la temperatura de la batería respecto a la temperatura ambiente. La principal diferencia radica en que en este caso se establecen unos márgenes de temperatura de funcionamiento dentro de los cuales se puede aplicar una razón de carga alta. Cuando se rebasa el límite superior de temperatura se reduce la corriente de carga y no se vuelve a incrementar hasta que la temperatura desciende al límite inferior. En la figura 5-6 se muestra el principio de funcionamiento de este método, la carga rápida se permite mientras la batería no supere una temperatura límite.

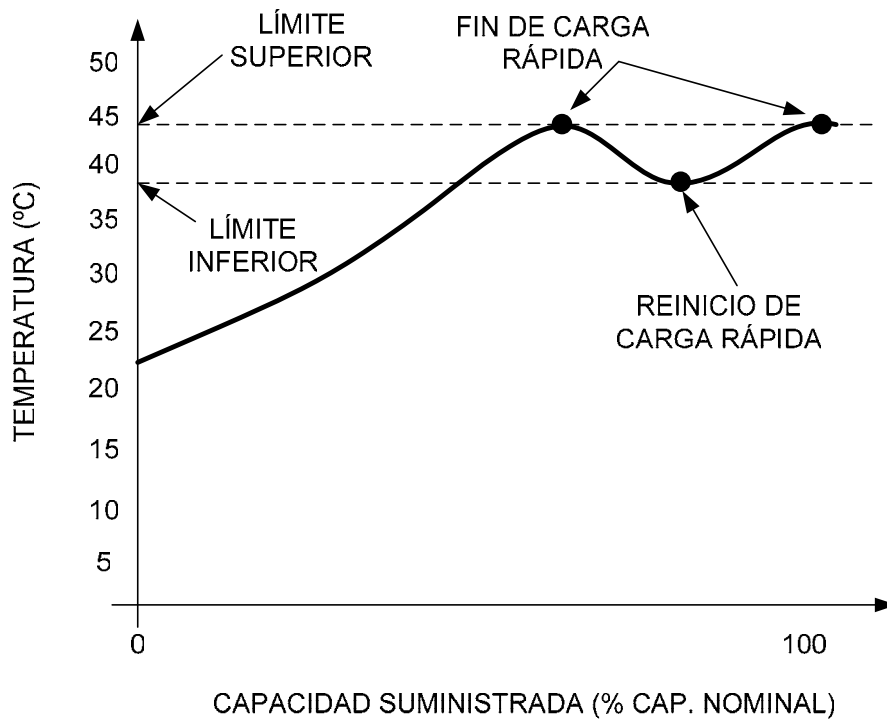


Figura 5-6. Método de carga basado en el control diferencial de la temperatura de la batería.

Los principales inconvenientes de este método son:

- No se logra reducir de forma significativa el tiempo de carga de la batería ya que los tiempos de espera para que la temperatura de la batería descienda hasta el límite inferior prefijado son grandes debido a que la temperatura es una variable de evolución lenta.
- Precisa de cuidados especiales para evitar que se apliquen razones de carga altas a la batería cuando ésta se entra en sobrecarga, debido a cambios en la temperatura ambiente. Por tanto, en este caso es necesaria también la utilización de al menos dos sensores de temperatura, uno para medir la temperatura ambiente y otro para medir la temperatura de la batería.
- Este método no es apropiado para carga rápida ya que la carga se mantiene siempre y cuando la temperatura de la batería se encuentre por

debajo del límite inferior. No existe una indicación de finalización de carga a menos que se utilicen otros medios para estimarla.

5.5.4 Seguimiento de la derivada de la temperatura de la batería

La razón de cambio que experimenta la temperatura cuando la batería se acerca a la zona de sobrecarga es una forma de conocer el instante en que es necesario detener la carga rápida o simplemente dar paso a una razón de carga mucho más baja.

En la figura 5-7 se muestra la evolución de la temperatura en una batería de Ni-MH cuando se le aplica una carga lenta de 0,1C a 23 °C.

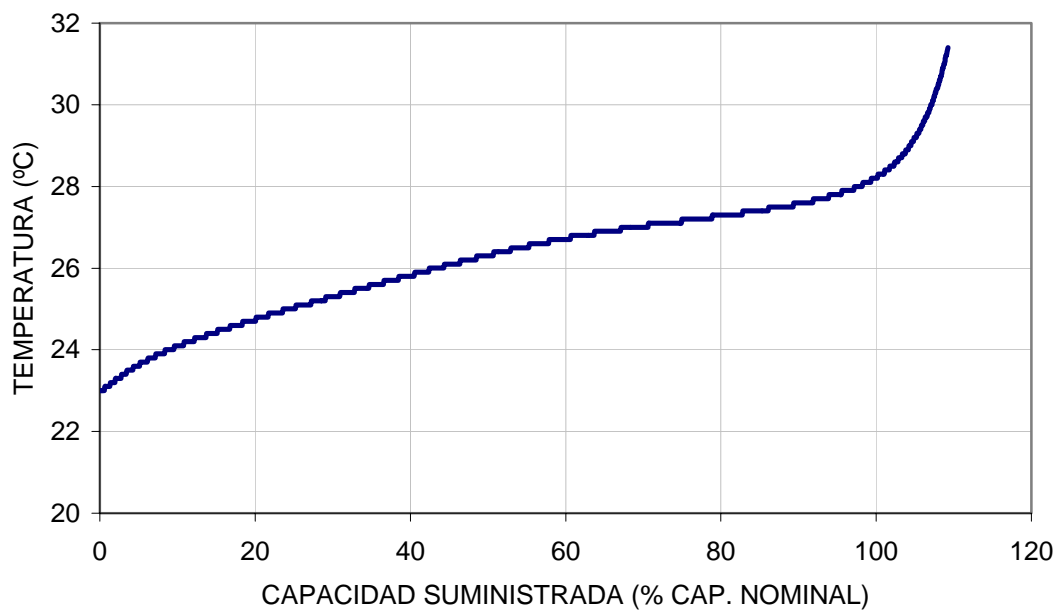


Figura 5-7. Evolución de la temperatura de una batería de Ni-MH durante una carga a una razón de carga de 0,1C y temperatura ambiente de 23 °C.

Como se puede apreciar en la figura 5-7, en la parte final de la carga y coincidiendo con la entrada en sobrecarga se produce un fuerte incremento de la temperatura de la batería. Este rápido incremento se puede detectar con el objetivo de finalizar el proceso de carga.

Los principales inconvenientes de este método de finalización de carga son:

- La derivada de la temperatura puede verse afectada por ruidos que se producen en el entorno de trabajo de la batería y por la propia amplificación de la señal captada por los sensores. En un ambiente ruidoso es posible que se produzcan errores y que el control se vuelva impreciso.

Para evitar la influencia de ruidos y mejorar la precisión del control se realiza un muestreo de la temperatura a intervalos de tiempo cortos e iguales, y se calcula su derivada después de promediar los valores de la temperatura en el entorno del punto de cálculo.

- La razón de cambio de la temperatura depende tanto de la tecnología de la batería como de la razón de carga utilizada (ver capítulo 4).

En las baterías de Ni-MH este método puede resultar adecuado cuando se utilizan razones de carga por debajo de 0,5C ya que al final de la carga se observa un rápido incremento de la temperatura (ver figura 5-7). Por el contrario, cuando se incrementa la razón de carga la batería alcanza la sobrecarga sin que se detecte una variación importante de su derivada de temperatura, tal y como se muestra en la figura 5-8 donde se ha utilizado una razón de carga de 0,5C a temperatura ambiente de 23 °C.

- La temperatura es una variable de evolución lenta y cuando se aplican razones de carga elevadas la sobrecarga puede alcanzarse antes de que se detecte un incremento apreciable de la temperatura de la batería (ver capítulo 4).

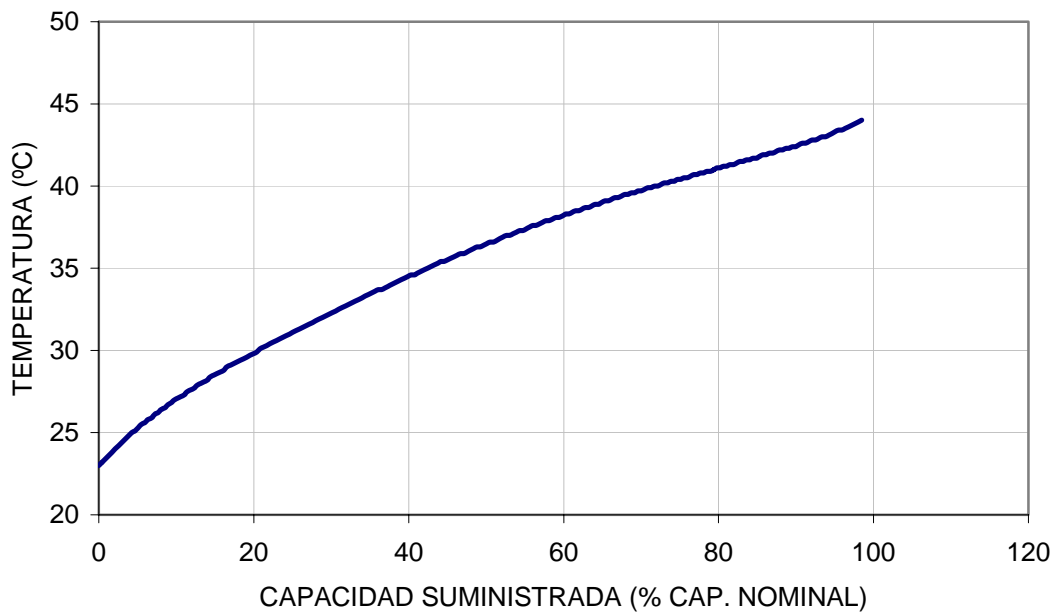


Figura 5-8. Evolución de la temperatura en una batería de Ni-MH durante una carga a una razón de carga de 0,5C y temperatura ambiente de 23 °C.

- La visualización de cambios significativos en la pendiente de la temperatura depende de la ubicación de los sensores.

Es importante recordar que la transmisión de calor desde el interior de la batería se produce a través de una determinada resistencia térmica (debida a la conductividad térmica de los elementos que componen la estructura de la batería). Por tanto, una variación rápida de la temperatura en el interior de la batería puede quedar enmascarada dependiendo del lugar donde se sitúen los sensores (este tema se aborda con más detalle en el capítulo 3).

Además, en muchos casos las baterías no vienen preparadas para situar un sensor de temperatura en el lugar idóneo para medir esta variable, dificultándose la utilización de esta señal para realizar el control de la carga.

- Este método no resulta efectivo con baterías de Ni-Cd.

En las baterías de Ni-Cd, según se pudo comprobar en el estudio de su comportamiento en carga en el capítulo 4, no se produce un cambio notable de la derivada de la temperatura hasta después de la entrada en sobrecarga, incluso cuando la razón de carga utilizada es 2,0C lo que invalida el método.

- Cuando la carga de la batería se realiza a temperaturas elevadas, se puede superar la temperatura límite antes de apreciar un incremento importante de la derivada de la temperatura de la batería (ver capítulo 4).

Por todo lo expuesto, aunque la medida de la temperatura de la batería aporta una información importante no es aconsejable utilizarla en carga rápida como método de finalización de carga. Sin embargo, esta variable sí debe utilizarse como medio de protección contra temperaturas de trabajo límites que degradarían la batería.

5.6 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA BASADOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA TENSIÓN DE LA BATERÍA

La medida de la tensión de la batería brinda una forma sencilla de controlar el proceso de carga y por ese motivo se utiliza en muchas ocasiones como método de finalización de la carga. No obstante, como se ha mostrado en el capítulo 4 la evolución de la tensión durante la carga depende de varios factores, fundamentalmente de la razón de carga y de la temperatura de trabajo.

En la figura 5-9 se muestra la evolución que sigue la tensión en diferentes tecnologías de baterías cuando se cargan a corriente constante. Como se puede apreciar en esta figura, en las baterías de Ni-Cd abiertas se produce un incremento significativo de la tensión cuando la batería se encuentra próxima a alcanzar la zona de sobrecarga.

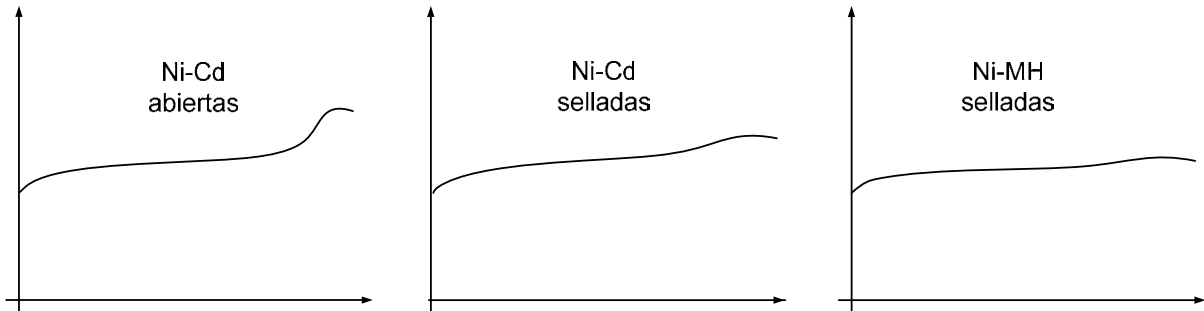


Figura 5-9. Evolución típica de la tensión durante la carga a corriente constante de diferentes tecnologías de baterías.

En el caso de las baterías selladas, tanto de Ni-Cd como de Ni-MH, la variación de tensión que se produce en la zona próxima a la sobrecarga es mucho más pequeña por lo que se necesitan dispositivos de medida más precisos para seguir su evolución.

5.6.1 Seguimiento de la tensión de la batería

La forma más simple de determinar el instante de finalización de la carga es detectando que la tensión de la batería ha alcanzado un determinado valor.

El método de control de la magnitud de la tensión durante la carga tiene los siguientes inconvenientes cuando se aplica carga rápida:

- El valor de la tensión de la batería en un instante determinado del proceso de carga varía si se trabaja en un margen amplio de temperaturas (ver capítulo 4).

La figura 5-10 muestra la evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante la carga a 1,0C a 23 °C y a 5 °C. Como se puede apreciar en esta figura, existen diferencias en la evolución de la tensión para un mismo régimen de carga que superan en ocasiones los 50 mV/celda. Esta desviación de la tensión producto de la temperatura se hace más significativa cuando se tiene un número grande de celdas conectadas en serie.

- Además, la tensión también varía en función de otros parámetros como el régimen de carga y el grado de envejecimiento de la batería, etc. (ver capítulo 4).
- Uno de los fallos más comunes en cualquier tecnología de batería son los cortocircuitos internos que dan lugar a la disminución de la tensión de la batería.

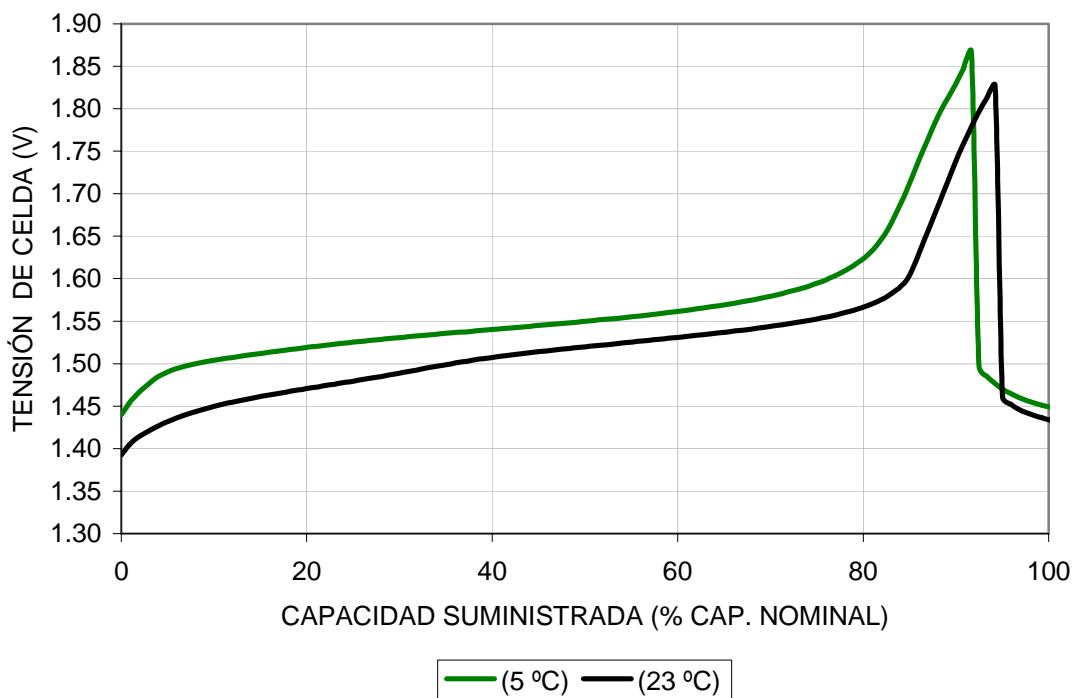


Figura 5-10. Evolución de la tensión de celda en una batería de Ni-Cd cuando se utiliza una razón de carga de 1,0C, a 5 °C y a 23 °C de temperatura ambiente.

Por todo lo expuesto, cualquier método de carga que dependa solo de la medida del valor de la tensión de la batería para finalizar la carga o dar paso a otra razón de carga mucho menor, puede conducir a graves errores que terminen dañando seriamente la batería.

5.6.2 Seguimiento de la derivada de la tensión de la batería

El control de la variaciones de la tensión de la batería en el tiempo es el método de finalización de la carga más usado por los diseñadores de cargadores de baterías

[62][68][90]. La figura 5-11 muestra la variación típica que experimenta la tensión de la batería en la parte final de la carga. En esta gráfica se pueden apreciar varias zonas que dan lugar a diferentes métodos de finalización de la carga:

- Control de la velocidad de crecimiento de la tensión y detección del punto de máxima derivada de tensión.
- Detección del punto de tensión máxima.
- Detección de la caída de tensión.

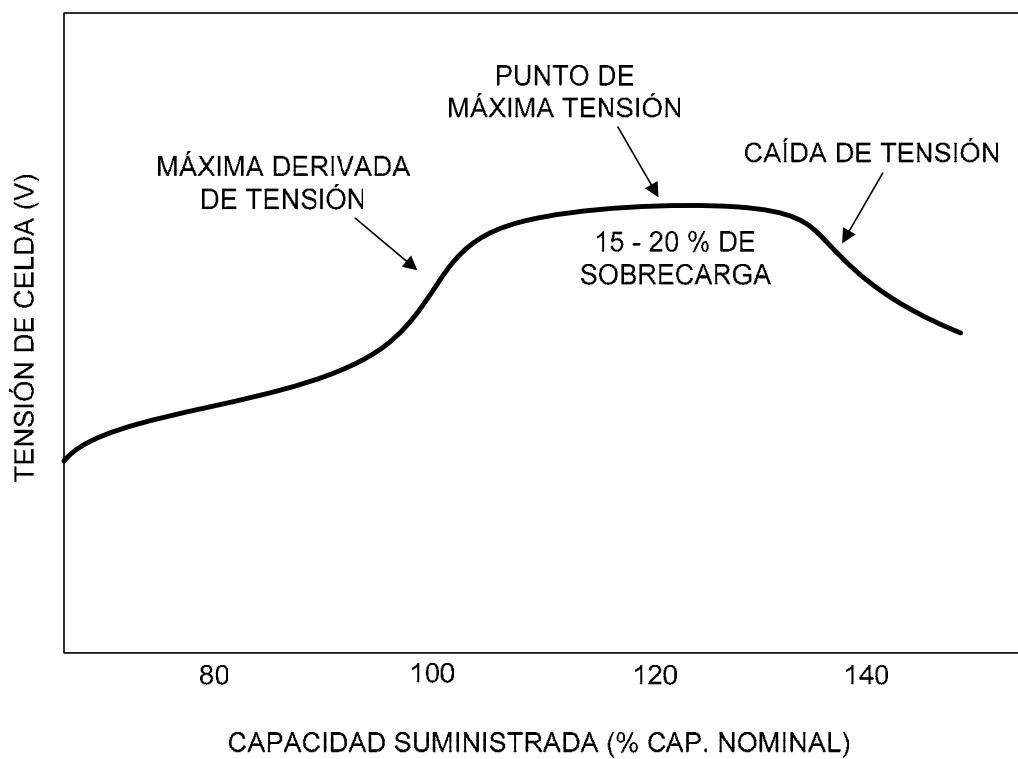


Figura 5-11. Evolución de la tensión de la batería en la parte final del proceso de carga.

Estos métodos tienen los siguientes inconvenientes:

- No resultan efectivos en las baterías de Ni-MH cuando se utiliza carga rápida, pues las variaciones de la tensión son mucho más pequeñas que

las observadas en las baterías de Ni-Cd y se pueden cometer errores de medida con facilidad (ver capítulo 4).

En la figura 5-12 se puede observar que la variación de la tensión de celda en una batería de Ni-MH, aún cuando se carga a una razón de carga elevada como 1,0C, es insignificante hasta el momento de detección de hidrógeno producto de la sobrecarga de la batería.

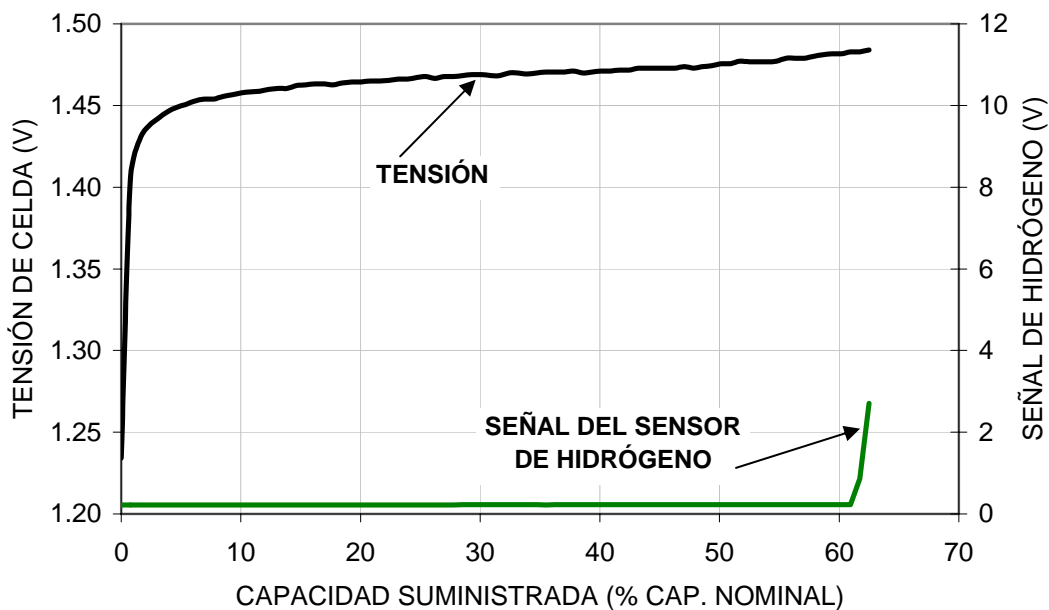


Figura 5-12. Evolución de la tensión durante la carga de una batería de Ni-MH con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

- Cuando se aplica carga rápida partiendo de un estado de carga avanzado, la velocidad de cambio de la tensión de la batería puede alcanzar valores parecidos o superiores a la velocidad de cambio que experimenta la tensión cuando la batería se aproxima al estado de sobrecarga. En este caso, la carga rápida no se completa debido a que el proceso de carga se detiene prácticamente desde su propio inicio.

En la figura 5-13 se puede observar la evolución de la tensión de celda y de su derivada cuando se aplica una carga de 0,2C a una batería de Ni-Cd cargada con un 60 por ciento de su capacidad nominal. Como se puede

observar, la velocidad de cambio de la tensión durante la parte inicial de la carga supera a la velocidad de cambio de la tensión en la parte final de la carga. Este fenómeno puede inducir a error en la detección de la finalización de la carga dejando parcialmente cargada la batería.

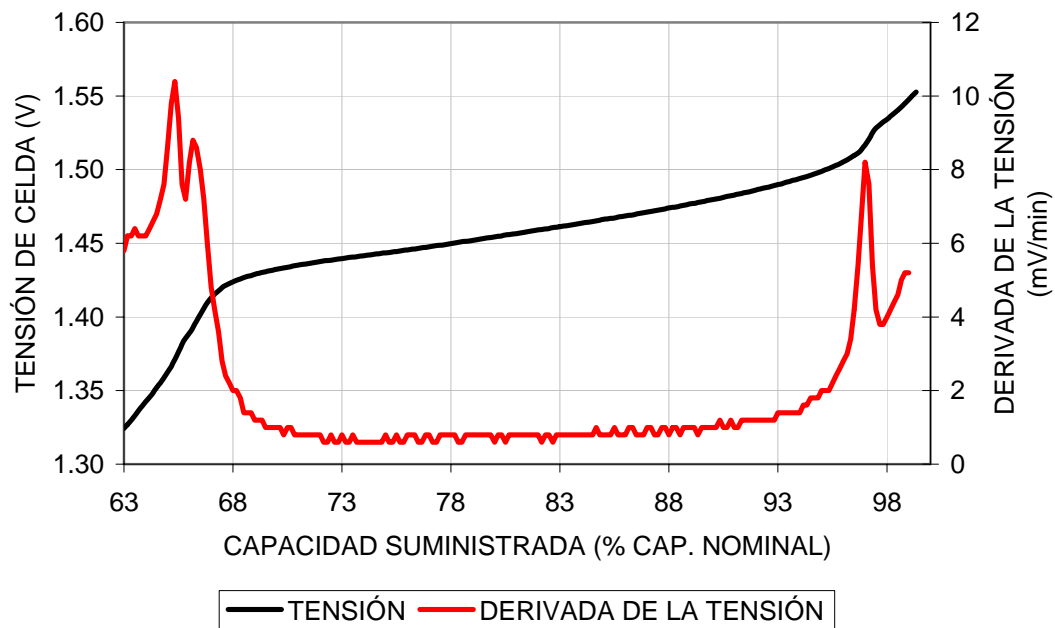


Figura 5-13. Evolución de la tensión de celda y de su derivada cuando se realiza una carga a 0,2C en una batería de Ni-Cd partiendo de un estado de carga inicial de aproximadamente el 60 por ciento de la capacidad nominal a 23 °C.

- La finalización de la carga mediante la detección del punto máximo de tensión o de un determinado incremento negativo de la tensión no logran anticiparse a la sobrecarga de la batería, lo que resulta peligroso cuando se utilizan razones de carga altas.

La figura 5-14 muestra la evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd cuando la carga se realiza a 1,0C y 23 °C. En esta figura se puede apreciar cómo antes de alcanzarse el punto de tensión máxima se detecta la producción de hidrógeno. En el punto de tensión máxima la batería ha soportado un 20 por ciento de sobrecarga respecto al instante

en que observa la presencia de hidrógeno. El tanto por ciento de sobrecarga se incrementa en la zona donde la tensión disminuye.

Cuando se utilizan regímenes de carga elevados, la sobrecarga de la batería (una vez detectada la presencia de hidrógeno) puede causar daños irreparables a la batería: sobrecalentamiento excesivo y pérdidas importantes de electrolito.

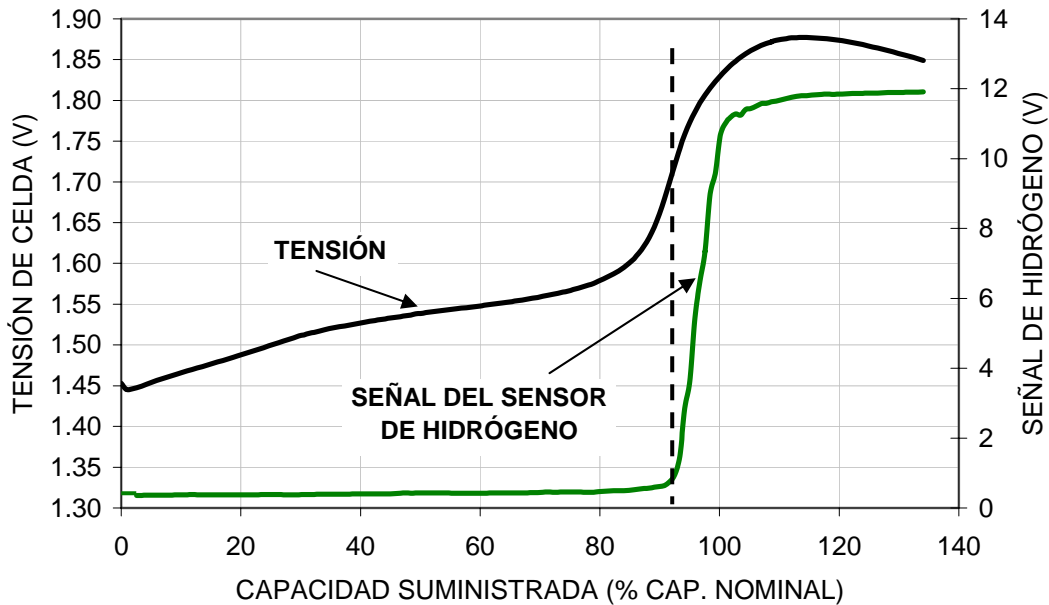


Figura 5-14. Evolución de la tensión durante la carga de una batería de Ni-Cd con una razón de carga de 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

CAPÍTULO

6

**MÉTODO OPTIMIZADO DE CARGA RÁPIDA
PROPUESTO PARA BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-
MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD**

6 MÉTODO OPTIMIZADO DE CARGA RÁPIDA PROPUESTO PARA BATERÍAS DE Ni-Cd Y DE Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD

Un método de carga rápida óptimo es un conjunto de soluciones integrales que permite la recarga de la batería en el menor tiempo posible minimizando los daños que pueda ocasionar la aplicación de regímenes de carga elevados. El método de carga rápida debe ser capaz, a través del estudio de la evolución de las principales variables que intervienen en el proceso de carga, de detener la carga o pasar a una razón de carga más baja cuando la batería ha almacenado la mayor capacidad posible, sin los peligros inherentes a la sobrecarga. Por tanto, un método de carga rápida carece de sentido si no está acompañado de un método preciso y fiable de detección del instante adecuado de finalización de la carga.

Además, un método de carga rápida óptimo debe cumplir los siguientes requisitos:

- No depender de las condiciones ambientales (fundamentalmente de la temperatura).

Como se ha demostrado en el capítulo 4, la temperatura ambiente tiene una marcada influencia sobre las variables que describen el comportamiento de la batería en carga, por lo que es importante contar con un método que tenga en cuenta dichas variaciones o bien no se vea afectado por las mismas.

- No depender de la forma constructiva de la batería ni de su capacidad en un margen suficientemente amplio (baterías de media y gran capacidad).
- No verse afectado por el estado de carga que tenga la batería al inicio del proceso de carga rápida.

La evolución de las variables que intervienen en los procesos de carga rápida se modifica cuando la batería comienza la carga desde un estado distinto al de descarga total.

- No introducir elementos de medida ajenos a la estructura de la batería que produzcan cambios en sus características tanto constructivas como funcionales.
- Prescindir de sistemas de medidas de elevada precisión.
- Prescindir de cálculos complejos que requieran de una elevada potencia de procesamiento.
- Compatibilidad con las tecnologías de Ni-Cd y de Ni-MH.
- Conseguir que la batería alcance la mayor capacidad posible en un corto periodo de tiempo (por encima de 90 por ciento de la capacidad nominal de la batería) sin hacerla funcionar en sobrecarga.
- Mantener la temperatura de la batería dentro de los límites adecuados para no provocar su envejecimiento prematuro.
- Tener un coste de implementación bajo respecto al sistema donde se emplean las baterías.

Aún cuando el coste de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad es elevado, es importante reducir el coste de los elementos necesarios para implementar el control de la carga.

- Minimizar las necesidades de mantenimiento de la batería.

El método de carga debe impedir que se produzcan pérdidas de electrolito importantes debido a la fuga de gases.

6.1 MÉTODO DE CARGA ÓPTIMO

En el capítulo 5 se ha discutido acerca de los métodos de carga, especialmente desde el punto de vista de la carga rápida, en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad.

El método más adecuado en cuanto a la forma de la tensión o de la corriente de carga aplicada a la batería, es el que utiliza una corriente constante. Este método es el más utilizado en las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad cuando funcionan en regímenes cíclicos de carga-descarga ya que presenta las siguientes ventajas:

- La carga se realiza en el menor tiempo posible.

En los métodos de carga que incluyen etapas a tensión constante, la corriente disminuye a medida que la batería aumenta su estado de carga y por tanto, el tiempo de recarga se incrementa apreciablemente.

- No se producen picos de corriente excesivos al comienzo de la carga, cuando la batería está totalmente descargada.

Aún con la batería totalmente descargada, la carga a corriente constante no produce picos de corriente como ocurre en el caso de la carga a tensión constante, donde se necesita una limitación de la corriente de carga inicial si se quiere aplicar carga rápida.

- De forma sencilla, se logra un control más preciso de la cantidad de carga suministrada a la batería durante la realización de la carga rápida.

La capacidad suministrada a la batería se calcula simplemente multiplicando el valor de la corriente aplicada por el tiempo de carga.

- Se evitan efectos indeseados de sobrecalentamiento (carrera térmica).

El aumento de la temperatura, según se detalla en el capítulo 2, produce una disminución de la resistencia interna de la batería. Por tanto, si la carga se realiza a tensión constante el aumento de temperatura produce un aumento de la corriente de carga, con el consiguiente aumento a su vez de la temperatura. Este proceso puede desencadenar un incremento incontrolado de la temperatura conocido como “carrera térmica”, si no existen protecciones adecuadas. Este fenómeno de inestabilidad térmica

de la batería no se produce cuando se utiliza una corriente constante para realizar la carga rápida.

Una vez seleccionada la forma de la corriente de carga (corriente constante) quedan dos aspectos que forman parte del método de carga y que son de mucha importancia: la razón de carga a utilizar y el método de detección de finalización de la carga.

6.2 SELECCIÓN DE LA RAZÓN DE CARGA RÁPIDA ÓPTIMA

Los principales requisitos que se deben tener en cuenta a la hora de escoger una razón de carga rápida son:

- El tiempo de carga requerido.

La razón de carga a utilizar durante una carga a corriente constante está directamente relacionada con el tiempo que se necesita para suministrar a la batería una determinada capacidad. Mientras mayor sea la razón de carga menor es el tiempo necesario para realizar la recarga. Como se observa en los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio (capítulo 4) es posible aplicar una razón de carga de $2,0C$ para alcanzar un porcentaje determinado de la capacidad nominal de la batería en menos de media hora.

- El porcentaje de carga que se suministra a la batería respecto a su capacidad nominal.

A medida que aumenta la razón de carga aplicada a la batería, disminuye de forma significativa el tiempo necesario para realizarla pero también disminuye la capacidad que la batería puede aceptar antes de alcanzar la sobrecarga. Por este motivo, es necesario se tenga en cuenta este compromiso.

- El porcentaje de capacidad real que se descarga de la batería respecto a su capacidad nominal.

La capacidad almacenada en la batería durante el proceso de carga rápida está relacionada directamente con la razón de carga aplicada y con la

eficiencia del proceso de carga (aceptación de carga). Mientras más alta es la razón de carga aplicada menor será la capacidad obtenida de la batería durante la descarga.

- La eficiencia energética del proceso de carga rápida.

A medida que aumenta la razón de carga aplicada el proceso se vuelve menos eficiente. La eficiencia energética (ver capítulo 4) no es más que la relación entre la energía que se puede extraer de la batería durante la descarga respecto a la energía suministrada durante la carga.

Como se deduce de los resultados mostrados en los capítulos 2 y 4, a medida que se incrementa la razón de carga, los valores de tensión y de corriente que se aplican a la batería son mucho mayores que los valores medidos durante la consiguiente descarga dando lugar a una disminución de la eficiencia de la carga. Esta disminución es consecuencia de las pérdidas debida a reacciones secundarias que producen un incremento de la temperatura y generan gases.

- La complejidad y el coste de la topología de potencia y de su sistema de control.

Teniendo en cuenta las elevadas potencias que se manejan cuando se trabaja con altas razones de carga se deben extremar las medidas de seguridad del control de la potencia y por tanto de los sistemas electrónicos de instrumentación electrónica, de supervisión y de control. En aplicaciones típicas de carga rápida (baterías de tracción de vehículos eléctricos) se diseñan cargadores capaces de suministrar potencias de varias decenas de kilovatios.

Por tanto, a medida que se utilizan razones de carga más altas se encarece el diseño del cargador de batería.

En función de los requisitos mencionados y de los resultados experimentales obtenidos que se detallan en el capítulo 4, las razones de carga rápida que se recomiendan utilizar en las tecnologías de baterías de Ni-Cd y de Ni-MH son:

Tecnología de Ni-Cd

- ◆ Razón de carga rápida recomendada de 1,0C (entre 5 °C y 33 °C).

Las razones que avalan que 1,0C se recomiende como razón de carga en las baterías de Ni-Cd son:

- El tiempo requerido para realizar la carga de las baterías es inferior a una hora.

El principal objetivo de la aplicación de una carga rápida es la disminución del tiempo de carga. Cuando se aplica una carga a 1,0C, el tiempo de carga se reduce aproximadamente un 90 por ciento respecto al tiempo requerido cuando se utiliza una carga lenta (carga a 0,1C).

Es importante destacar que con el empleo de razones de carga superiores (2,0C) se puede reducir, aún más, el tiempo de carga. Sin embargo, en este caso los índices de comportamiento de las baterías no muestran resultados satisfactorios.

- La capacidad que se suministra a las baterías antes de alcanzar la sobrecarga es alta (por encima del 90 por ciento de su capacidad nominal) para todas las temperaturas estudiadas (entre 5 °C y 33 °C).

Como se muestra en el capítulo 4, la capacidad que la batería es capaz de aceptar disminuye a medida que se incrementa la razón de carga. El incremento de la razón de carga anticipa el instante en que se produce la sobrecarga y la batería queda con un porcentaje de carga inferior al que acepta cuando se carga con una razón más baja. Por ejemplo, cuando la carga se realiza a 0,1C y 23 °C las baterías de Ni-Cd admiten aproximadamente un 10 por ciento más de capacidad que cuando se cargan a 1,0C y 23 °C. Cuando se emplea una razón de carga de 2,0C, la capacidad que admiten las baterías antes de que se alcance la sobrecarga es inferior en más de un 15 por ciento a la que se puede

suministrar aplicando carga lenta (finalizando la carga, en ambos casos, cuando se detecta la sobrecarga).

- La aceptación de carga es alta (97 por ciento).

En el capítulo 4 se muestra que para las temperaturas de trabajo estudiadas, la capacidad descargada de las baterías de Ni-Cd respecto a la capacidad cargada es alta cuando se emplea una razón de carga de 1,0C (aproximadamente un 97 por ciento). Dado que la capacidad suministrada supera el 90 por ciento, la capacidad extraída de las baterías se sitúa entorno al 90 por ciento de su capacidad nominal.

En el caso de la carga a 2,0C, aún cuando la aceptación de carga también es alta (97 por ciento) la capacidad que se puede extraer de la batería es inferior al 90 por ciento de la capacidad nominal, lo que se debe a la baja capacidad suministrada durante la carga (sobrecarga anticipada). A temperatura de funcionamiento baja (5 °C), la capacidad que puede extraerse de la batería es demasiado baja, solo un 80 por ciento de la capacidad nominal de la batería. La conclusión es que cuando se usa la razón de carga de 2,0C las baterías quedan cargadas sólo de forma parcial.

- La eficiencia energética se considera aceptable (79 por ciento).

Como se deduce de los datos expuestos en el capítulo 4, la eficiencia energética cuando se realiza la carga rápida de las baterías a 1,0C disminuye aproximadamente un 6 por ciento respecto a la mayor eficiencia energética observada (85 por ciento utilizando una razón de carga de 0,1C a 23 °C). La disminución de la eficiencia energética cuando se aplica carga rápida a 2,0C es mayor de un 10 por ciento.

- Buen comportamiento a diferentes temperaturas de trabajo.

Las baterías cargadas a 1,0C muestran un comportamiento estable. El incremento de temperatura producido durante la carga no es importante,

aproximadamente de 5 °C sobre la temperatura de inicio de la carga. Este bajo incremento de la temperatura de las baterías de Ni-Cd se debe fundamentalmente a la naturaleza endotérmica de las reacciones de carga, aún cuando se produzca un aumento de la temperatura desde el propio inicio de la carga, debido a la elevada corriente de carga empleada (las pérdidas óhmicas enmascaran el carácter endotérmico de las reacciones de carga).

La carga a 1,0C se puede realizar en condiciones seguras en las condiciones estudiadas. Para temperaturas superiores a 33 °C es necesario tomar medidas de protección adicionales, aunque no es recomendable la carga rápida a temperaturas de funcionamiento altas. La temperatura más apropiada para realizar la carga rápida a 1,0C es 23 °C.

Además, cuando se trabaja con una razón de carga de 1,0C no se producen deformaciones de la curva de tensión carga como sucede en el caso de carga a 2,0C fundamentalmente a temperaturas bajas (ver figura 6-1).

La figura 6-2 muestra la sobretensión que se produce al inicio de la carga cuando en una batería de Ni-Cd se utiliza una razón de 2,0C y temperatura ambiente de 5 °C. A esta temperatura, la resistencia interna de la batería es máxima y las pérdidas que se producen en forma de calor se incrementan (se describe en el capítulo 4).

El estrés impuesto a las baterías de Ni-Cd de media y gran capacidad cuando se emplea la razón de carga de 2,0C, no se considera adecuado en un método optimizado de carga rápida para uso frecuente. En ningún caso se deben aplicar razones de carga superiores a 2,0C.

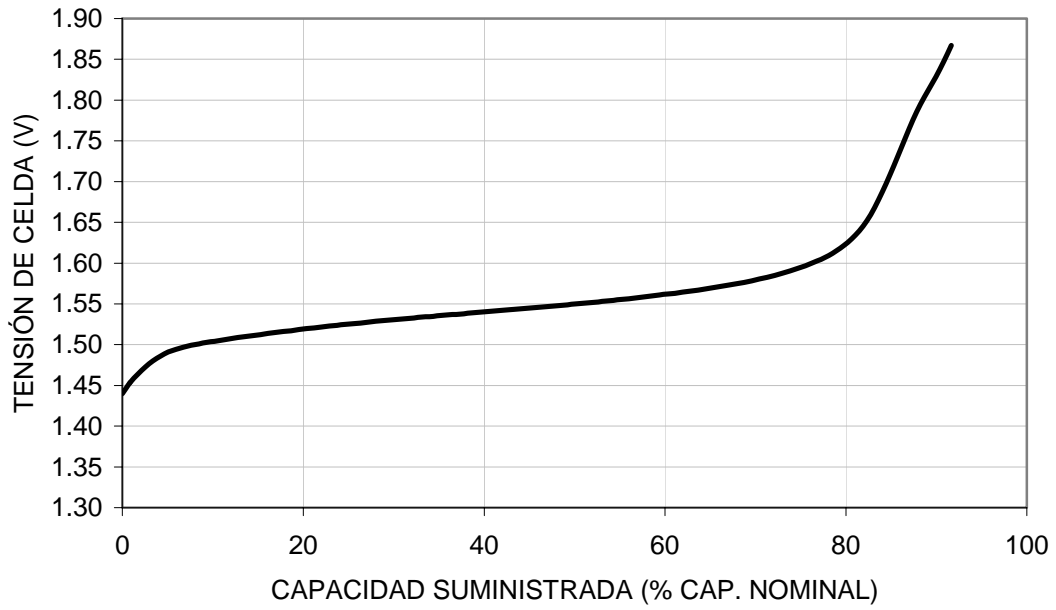


Figura 6-1. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 1,0C y a temperatura ambiente de 5 °C.

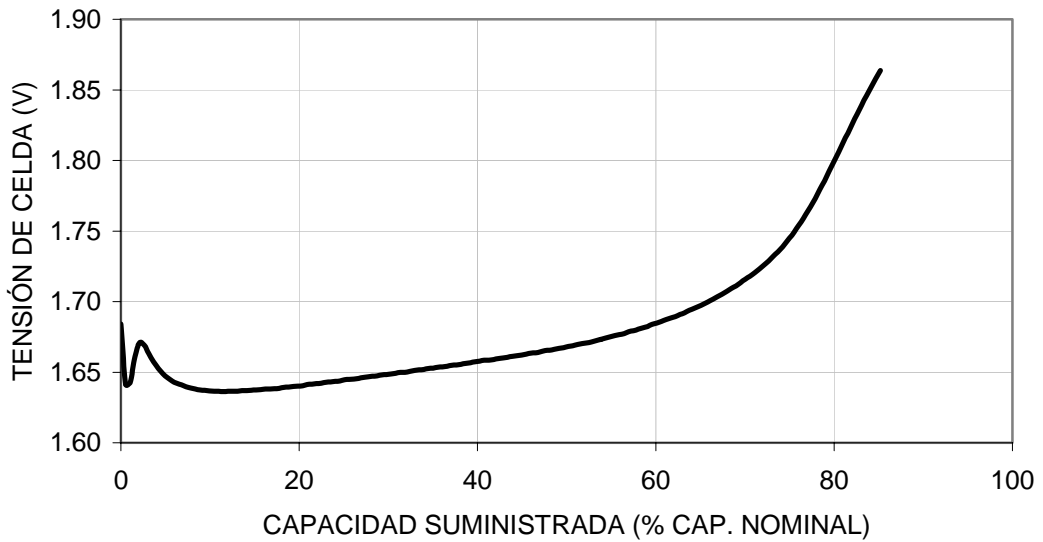


Figura 6-2. Evolución de la tensión de celda de una batería de Ni-Cd durante una carga a 2,0C y a temperatura ambiente de 5 °C.

Tecnología de Ni-MH

- ◆ Razón de carga rápida máxima recomendada de 0,5C (entre 5 °C y 23 °C).

Las razones que avalan que 0,5C se recomiende como razón de carga máxima en las baterías de Ni-MH son:

- El tiempo requerido para realizar la carga de las baterías es inferior a dos horas.

Las baterías de Ni-MH, a diferencia de las baterías de Ni-Cd, experimentan un crecimiento acelerado de la temperatura desde el comienzo de la carga debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones electroquímicas. Por tanto, el principal problema que impide el aumento de la razón de carga por encima de 0,5C para disminuir aún más el tiempo de carga, es el rápido incremento de la temperatura.

- La capacidad que se puede suministrar a las baterías antes de alcanzar la sobrecarga es alta (100 por ciento aproximadamente) como se demuestra en el capítulo 4.

Utilizando la razón de carga de 0,5C se suministra a las baterías de Ni-MH prácticamente el 100 por ciento de su capacidad nominal, excepto a temperaturas altas (por ejemplo 33 °C) donde solo se suministra un 42 por ciento de su capacidad nominal. Esta disminución drástica de la capacidad suministrada se debe a que cuando se trabaja a temperatura ambiente alta, el límite de temperatura establecido para esta tecnología (45 °C) se alcanza de forma anticipada, y como resultado de esto, es necesario detener la carga rápida aún cuando no se ha detectado la producción de gases (según plantea la metodología de ensayo propuesta en el capítulo 3).

Cuando se aplica la razón de carga de 1,0C, la capacidad que se puede suministrar a la batería, aún cuando la temperatura ambiente es de 23 °C es muy baja (aproximadamente un 40 por ciento de la capacidad nominal de la batería). Estas condiciones no ofrecen una carga adecuada a la

batería y provocan un calentamiento excesivo por lo que se desecha su uso.

- La aceptación de carga es alta (96 por ciento).

Como se muestra en el capítulo 4, la relación entre la capacidad descargada y la suministrada durante la carga a 0,5C es alta (96 por ciento, superior al 92 por ciento cuando se aplica carga a 0,1C). Sin embargo, a temperaturas elevadas de trabajo (por ejemplo, 33 °C) la capacidad que se puede descargar de la batería es aproximadamente un 40 por ciento de su capacidad nominal, ya que el sensor de temperatura produce de forma anticipada el corte de la carga al alcanzar los 45 °C (límite de temperatura establecido). Este problema se repite a temperatura ambiente de 23 °C cuando la batería se carga a 1,0C, debido a la baja capacidad suministrada. En este caso, al igual que en el anterior, solo se logra descargar un 40 por ciento de la capacidad nominal de la batería.

- La eficiencia energética se considera aceptable (84 por ciento).

La eficiencia energética (como se muestra en el capítulo 4) se mantiene alta a 0,5C respecto a la obtenida durante la aplicación de carga lenta (0,1C), reduciéndose solo un 2 por ciento. Si se aplica carga a 1,0C, la eficiencia energética se reduce un 7 por ciento aproximadamente.

La tecnología de Ni-MH no se puede someter a razones de carga tan altas como las utilizadas en baterías de Ni-Cd. El principal problema de la tecnología de Ni-MH es el rápido incremento que experimenta la temperatura desde el propio inicio de la carga, aún cuando la razón de carga utilizada es baja. Por este motivo, no se recomienda la aplicación de carga rápida de 0,5C cuando la temperatura ambiente supera los 23 °C.

Cuando se aplica una razón de carga de 1,0C el incremento de temperatura de la batería es excesivo (30 °C por encima de la temperatura inicial de carga) y tiene que actuar la protección de temperatura antes de que se pueda alcanzar un porcentaje de capacidad suministrada aceptable. En ningún caso, la capacidad descargada de la batería supera el 73 por ciento de la capacidad nominal.

Durante la carga rápida de baterías de Ni-MH es necesario un sensor de temperatura para proteger contra temperatura límite ya que los incrementos de temperatura, como se ha observado en la experimentación, son mucho mayores que en la tecnología de Ni-Cd.

6.3 EL MÉTODO DE DETECCIÓN DE FIN DE CARGA

El principal objetivo de los métodos de detección de fin de carga es finalizar el proceso de carga rápida cuando la batería alcanza el estado de sobrecarga ya que a partir de este punto el proceso de carga deja de ser eficiente. La pérdida de eficiencia se debe a que prácticamente toda la corriente de carga se emplea en producir calor y gases, por tanto, el estado de carga de la batería no experimenta un incremento significativo.

Las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH pueden resistir determinadas sobrecargas cuando la carga se realiza a razones bajas. Sin embargo, el aumento que experimenta la temperatura y la producción de gases puede ser peligroso y provocar daños irreparables a la estructura física de la batería cuando las razones de carga aplicadas son altas.

En el capítulo 4 se describe la evolución de la tensión, de la temperatura y del instante en que se inicia la sobrecarga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH en función del régimen de carga aplicado y de la temperatura ambiente. A partir de los resultados mostrados en el capítulo 4, en el capítulo 5 se analizan desde un punto de vista crítico los diferentes métodos de detección de fin de carga que se utilizan en estas baterías.

Ninguno de los métodos analizados se puede aplicar por sí solo con total fiabilidad en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH (de forma general y considerando todas las condiciones de funcionamiento) ya que no asegura la finalización de la carga antes de la sobrecarga de la batería cuando se utiliza una razón de carga elevada (carga rápida).

Si se quiere una solución fiable para cortar el proceso de carga antes de que se produzcan sobrecargas indeseadas es necesario aplicar varios de estos métodos de forma conjunta y coordinada, no obstante esta solución puede resultar cara.

Teniendo en cuenta los requisitos que debe cumplir un método de carga rápida óptimo (mencionados al inicio de este capítulo) y después de una extensa experimentación realizada, se propone el siguiente método de detección de fin de carga:

- ◆ Método de finalización de la carga basado en el seguimiento de la producción de hidrógeno.

Las razones fundamentales que avalan la utilización de este método tanto en baterías de Ni-Cd como en baterías de Ni-MH son:

- Independencia de la forma constructiva de la batería, y de su capacidad en un margen suficientemente grande (baterías de media y gran capacidad).

Se ha comprobado que independientemente de la forma constructiva de la batería y de su capacidad nominal, se produce hidrógeno cuando el proceso de carga pierde su eficiencia debido a la entrada en sobrecarga. Este hidrógeno emana al exterior y se detecta a través de los sensores ubicados en el entorno de la batería.

Es importante destacar que este proceso ocurre aún en condiciones de carga lenta, tanto en baterías de Ni-Cd como en baterías de Ni-MH, es decir, no es una condición exclusiva de la carga rápida. Por este motivo, en las especificaciones de los fabricantes se recomienda situar las baterías en

lugares donde exista una ventilación adecuada que permita evacuar el hidrógeno producido durante la sobrecarga.

➤ Independencia de la temperatura ambiente.

Las variables que influyen en el proceso de carga de la batería varían su comportamiento en función de la temperatura de trabajo. Por este motivo, es difícil definir con exactitud unas condiciones únicas para la finalización de la carga rápida, ya sea de tensión o propiamente de la temperatura de la batería, sin evitar que la batería quede expuesta a sobrecarga.

En el capítulo 5 se describen algunas de las principales desventajas presentes en los métodos de detección de fin de carga que utilizan estas variables (fundamentalmente debido a cambios en la temperatura de trabajo). La variación de la temperatura hace que cambie el instante en que se produce la sobrecarga de la batería. Por ejemplo, en los estudios que se muestran en el capítulo 4 se observa cómo la entrada en sobrecarga se anticipa cuando la temperatura de funcionamiento es de 5 °C.

A través de la detección del hidrógeno que se produce cuando comienza la sobrecarga, se evita que se continúe la carga rápida independientemente de la temperatura de trabajo.

➤ Independencia del estado de carga de la batería.

Algunos de los métodos analizados en el capítulo 5 (métodos basados en la medida del tiempo de carga) necesitan de un conocimiento previo del estado de carga de la batería. La determinación del estado de carga en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH no es una tarea sencilla y los métodos existentes que aportan estimaciones carecen de precisión y fiabilidad.

Además, los métodos de carga analizados en el capítulo 5 que se basan en la evolución que siguen las formas de onda tanto de la tensión como de la temperatura desde el comienzo de la carga conducen a errores cuando la carga rápida comienza a partir de un estado de carga avanzado.

- Suministra a la batería la mayor capacidad posible.

Con la utilización de este método de finalización de carga la batería acepta de forma eficiente la máxima capacidad posible sin sufrir sobrecarga.

Debido a las variaciones significativas que experimentan las baterías cuando cambian las condiciones de funcionamiento, se necesitaría de una extrema precisión de los métodos descritos en el capítulo 5 para no adelantarse o retardarse en la detección de la finalización de la carga rápida y por tanto, dejar de suministrar a la batería la capacidad adecuada o someterla a una sobrecarga excesiva respectivamente.

- Gran sencillez de implementación y bajo coste.

La utilización de un solo sensor de hidrógeno puede detener el proceso de carga rápida de un grupo de módulos que se encuentren dentro de un determinado recinto sin necesidad de utilizar un sensor por cada módulo. Además, no se necesita precisión en la medida ya que no interesa medir concentraciones de hidrógeno sino la presencia de éste en el ambiente.

Se evitan cálculos complejos y procesamiento de grande cantidades de datos, como se precisa en otros métodos de carga que incluyen cálculos de pendiente o cálculos para estimar el estado de carga de la batería a partir de considerar el balance neto de capacidad cargada/descargada.

No existen problemas de espacio para la ubicación del sensor, pues a diferencia de las baterías de baja capacidad, las baterías de media y gran capacidad ocupan volúmenes importantes, mucho mayor que el requerido para la ubicación de un sensor de hidrógeno. Además, normalmente los espacios reservados para las baterías de media y gran capacidad son grandes ya que en ocasiones deben conectarse varios módulos para satisfacer los requisitos exigidos por la aplicación específica.

Además, dado que el método de carga propuesto está enfocado a baterías de media y gran capacidad de Ni-Cd y de Ni-MH cuyos costes son

elevados, se considera que el coste adicional que supone la inclusión de un sensor de gas es despreciable.

➤ Compatible con baterías de Ni-Cd y de Ni-MH.

Es indiferente a la tecnología de batería (Ni-Cd o Ni-MH). Ambas tecnologías producen gases cuando alcanzan la sobrecarga tanto a bajas razones de carga como cuando se utiliza carga rápida.

Algunos métodos basados en el seguimiento de la pendiente de la tensión, que pueden resultar efectivos en determinadas aplicaciones, solo se pueden utilizar de forma fiable en las baterías de Ni-Cd abiertas. Las variaciones de la tensión que se producen en las baterías selladas tanto de Ni-Cd como de Ni-MH son mucho más pequeñas y en ocasiones, pueden conducir a errores en la detección del fin de carga. Así pues, este método no se puede utilizar de forma general en las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH ya que se necesita un ajuste preciso de los valores de la variable de control para cada caso y además, el empleo de dispositivos de medida y de procesamiento de señal capaces de detectar las pequeñas variaciones que se producen en la tensión.

Las figuras 6-3 y 6-4 muestran las derivadas de la tensión de celda de baterías de Ni-Cd y de Ni-MH en función de la capacidad suministrada como porcentaje de la capacidad nominal de la batería.

➤ Minimización del mantenimiento de las baterías.

Debido a que la carga se detiene apenas se detecta la evolución de hidrógeno, las pérdidas de electrolito que se producen son despreciables. De hecho, en ocasiones las pérdidas son mayores cuando se aplica carga lenta, ya que se permite un porcentaje de sobrecarga de la batería durante un determinado tiempo.

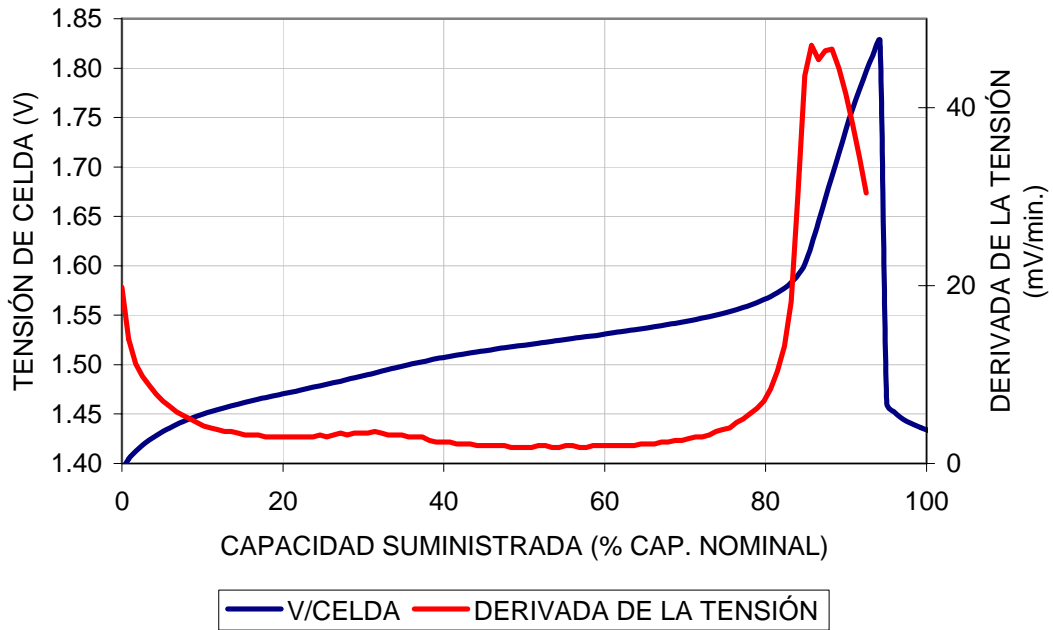


Figura 6-3. Tensión de celda y su razón de cambio de una batería de Ni-Cd cuando se carga a 1,0C y 23 °C.

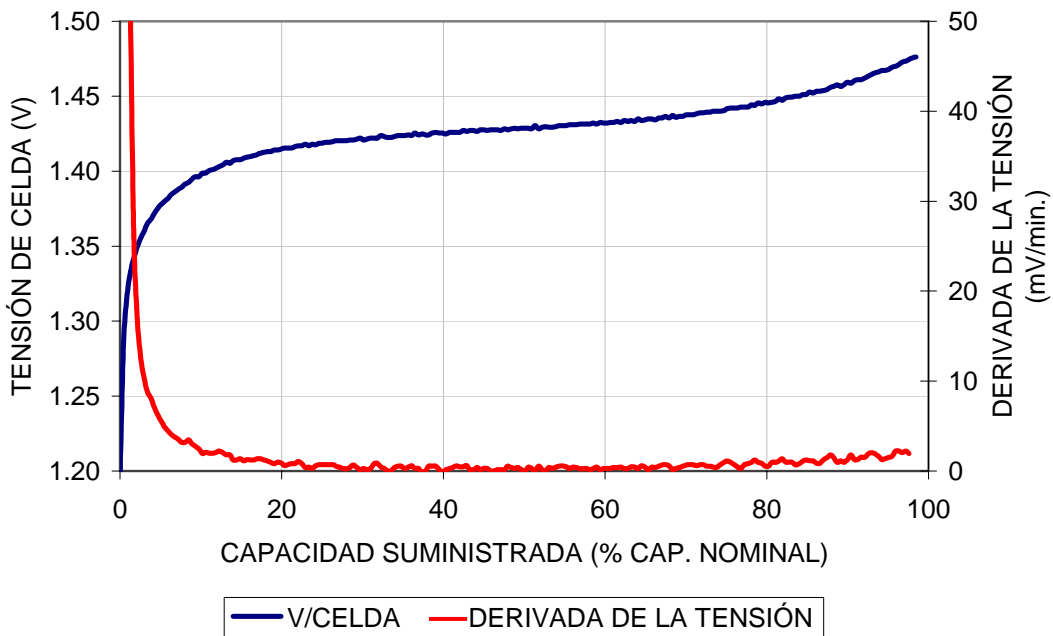


Figura 6-4. Tensión de celda y su razón de cambio en una batería de Ni-Cd durante la carga a 1,0C y temperatura ambiente de 23 °C.

- Adicionalmente, sirve de medio de protección.

La inclusión de un sensor de hidrógeno constituye, además de una forma de detectar el fin de carga, una medida de protección adicional ante la presencia de concentraciones importantes de hidrógeno en el recinto donde se encuentren las baterías. Es importante recordar que aún cuando se utilizan razones de carga bajas, las baterías producen gases una vez que se alcanza la sobrecarga.

Finalmente se puede concluir que se ha comprobado la fiabilidad del método de carga propuesto (tanto la magnitud de la razón de carga como el método de detección de fin de carga) en numerosos ciclos de carga-descarga con diferentes razones de carga (carga lenta y carga rápida) y en diferentes condiciones de temperatura tanto en baterías de Ni-Cd como en baterías de Ni-MH.

De cualquier manera, siempre existen particularidades donde la aplicación de un método de carga determinado, y en especial de carga rápida, tiene ciertos inconvenientes. Los principales inconvenientes del método de carga propuesto son:

- En el caso de baterías de Ni-MH se precisa de un sensor de temperatura ya que el incremento de temperatura que se produce en estas baterías es grande y en ocasiones puede superarse el límite establecido por el fabricante.
- En condiciones de laboratorio, donde los ensayos de carga-descarga se repiten con iguales características y debido a que se evita la sobrecarga de la batería, y especialmente en baterías de Ni-Cd, se puede observar una reducción gradual de la capacidad que se puede suministrar a la batería (y por tanto una disminución de la capacidad que se puede obtener de la batería en la siguiente descarga) a medida que se incrementa el número de ciclos de carga-descarga.

Este inconveniente no es ajeno al resto de métodos de carga cuando las baterías se someten a repetidos ciclos de carga-descarga bajo determinadas condiciones. Sin embargo, la solución es bastante sencilla y solo con aplicar una sobrecarga después que se alcanza el punto de detección de fin de carga

se logra que la batería recupere la capacidad pérdida. La razón de carga apropiada durante esta sobrecarga debe ser baja (inferior a 0,1C). Ésta es una de las razones por las que cada vez que se finaliza un determinado tipo de ensayo cíclico deben realizarse ciclos de acondicionamiento (incluyendo sobrecarga) para partir siempre de una misma capacidad de batería y evitar errores en la información recogida. Este aspecto se detalla en el capítulo 3 donde se establece la metodología de ensayos.

Algunas consideraciones adicionales que se deben tener en cuenta cuando se utiliza el método de carga propuesto son:

- Mantener una ventilación adecuada del recinto donde se encuentren ubicadas las baterías para que se evacuen de forma segura los gases producidos al final de la carga. Esta consideración no está ligada únicamente a este método de carga ya que todos los fabricantes advierten de esta necesidad, incluso durante la aplicación de carga lenta donde se permite determinada sobrecarga de la batería. Aunque en el caso del método de carga rápida propuesto, la carga termina de forma inmediata al detectarse la presencia de hidrógeno, siempre deben tomarse las medidas oportunas para que el porcentaje límite de hidrógeno en aire no constituya una mezcla explosiva.

6.4 CARGA DE LLENADO

Una vez detenida la carga rápida se puede continuar cargando la batería pero con una razón de carga lo suficientemente baja que evite la sobrecarga de la batería. No obstante, si se necesita carga rápida es porque se requiere cargar la batería en el menor tiempo posible y por tanto, no tiene sentido continuar aplicando ningún tipo de carga adicional a menos que se disponga de tiempo para ello.

La razón de carga que se escoja para continuar la carga después de una carga rápida influye directamente sobre las pérdidas de agua del electrolito y aumenta las necesidades de mantenimiento. Por este motivo, no debe aplicarse durante largos periodos de tiempo.

La recomendación es aplicar regímenes de carga inferiores a 0,1C (por ejemplo, 0,05C) tanto en baterías de Ni-Cd como de Ni-MH, y durante un periodo de tiempo que suponga una sobrecarga aproximada de un 20 o un 30 por ciento. Regímenes de carga más elevados (0,1C o superiores) provocan un aumento continuo de la temperatura de las baterías. Sobrecargas superiores no aportan beneficios y alargan innecesariamente el tiempo de carga de la batería.

CAPÍTULO

7

CONCLUSIONES Y APORTACIONES

7 CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El desarrollo alcanzado en los últimos años por la electrónica ha posibilitado cada vez más el uso de sistemas que requieren para su funcionamiento de energía eléctrica proveniente de baterías de media y gran capacidad. Merecen mención especial aquellas aplicaciones donde la batería tiene que funcionar bajo regímenes cíclicos de carga-descarga como los sistemas de tracción eléctrica (vehículos industriales como carretillas paletizadoras, vehículos comerciales como motocicletas o automóviles, transporte público, sillas de ruedas, pequeños vehículos de recreo, etc.).

El incesante desarrollo de los sistemas electrónicos de potencia y los requerimientos cada vez más exigentes de las aplicaciones han estimulado a los fabricantes de baterías a mejorar las características y las prestaciones de las tecnologías existentes y a continuar en la búsqueda de nuevas tecnologías que respondan a las exigencias actuales.

Una de las necesidades más inmediatas de las aplicaciones cíclicas es la reducción del tiempo de carga. Con los métodos de carga tradicionales una batería necesita más de 10 horas para alcanzar un estado de carga cercano a su capacidad nominal. Ésta es la razón fundamental del esfuerzo realizado en la búsqueda de soluciones que permitan la carga de la batería de forma rápida y segura.

- En el capítulo 1 se han estudiado las principales tecnologías de baterías utilizadas en aplicaciones cíclicas de carga-descarga. Después de realizar un análisis comparativo de los principales índices a considerar cuando se evalúa el comportamiento de una tecnología de batería para aplicaciones cíclicas, haciendo especial énfasis en la capacidad de aceptar carga rápida, se procede a la selección para el estudio del comportamiento ante carga rápida de las tecnologías de Ni-Cd y de Ni-MH. Estas tecnologías de baterías tienen características atractivas para su empleo en aplicaciones cíclicas como alta densidad de energía, alta potencia específica, elevado número de ciclos de carga-descarga, etc.

- Uno de los primeros problemas resueltos en esta tesis es el vacío de información que existe sobre el comportamiento de las baterías de media y gran capacidad de Ni-Cd y especialmente de Ni-MH.

En el capítulo 2 se estudia el comportamiento de estas tecnologías durante la descarga con el objetivo de determinar sus principales características de funcionamiento:

- Evolución de la tensión de vacío y de la resistencia interna equivalente en función del grado de descarga y de la temperatura ambiente, lo que permite la caracterización de la curva de descarga.
- Influencia de la temperatura ambiente y de otras condiciones de trabajo como la aplicación de sucesivos ciclos de “carga-descarga parcial” en las prestaciones de las baterías.

Además, la información obtenida de la experimentación permite controlar los fenómenos asociados con la descarga para que no enmascaren los efectos de la carga y especialmente de carga rápida, discriminando las particularidades asociadas a los procesos de carga-descarga.

- La principal aportación del capítulo 3 es la definición de una metodología de ensayos que permite realizar de forma fiable y segura los experimentos requeridos para el estudio de los procesos de carga en baterías de media y gran capacidad, haciendo especial énfasis en la carga rápida. Dada la escasa información acerca de estudios de comportamiento de baterías de media y gran capacidad bajo condiciones de carga rápida y teniendo en cuenta que las metodologías existentes para la experimentación de baterías están dirigidas fundamentalmente a probar características de funcionamiento muy específicas (características de diseño como capacidad, densidad de energía, potencia específica, etc.) la definición de una metodología de ensayos para estudios de carga rápida es imprescindible.

Otra aportación de este capítulo es la concepción del diseño de los bancos de ensayos para la implementación de la metodología definida. Además de la

selección y el diseño de equipos de potencia para realizar de forma precisa y fiable la carga-descarga de baterías merece la pena destacar la inclusión de elementos de medida para la detección de la finalización de la carga a través de la detección de gases, especialmente hidrógeno. Los bancos de ensayos implementados permiten en condiciones de laboratorio, realizar la carga y descarga de las baterías de forma totalmente controlada para facilitar su posterior análisis concibiendo todos los elementos de control y supervisión de manera que se puedan probar diferentes métodos de carga. La potencialidad de los bancos de ensayos implementados se completa con el desarrollo de programas específicos de control basados en el lenguaje de programación gráfica LabVIEW.

Además, en el capítulo 3 también se presentan los programas específicos de tratamiento de los datos obtenidos durante los ensayos realizados. Estos programas permiten la obtención de resultados precisos y fiables sobre la base de la comparación de las variables que intervienen en los procesos de carga-descarga.

- La caracterización del comportamiento de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH durante la carga es una de las aportaciones más importantes de esta tesis pues no existe información tan detallada como la que se muestra en el capítulo 4 ni se han realizado estudios tan exhaustivos y en condiciones que permitan asegurar la fiabilidad de los resultados. Las principales aportaciones realizadas en este capítulo son:
 - Se recoge el comportamiento durante la carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH cuando se las somete desde razones de carga bajas (0,1C -propia de carga lenta-) hasta 2,0C (carga rápida). Esto permite evaluar de forma comparativa la influencia que tiene el incremento de la razón de carga en las baterías.
 - Dado que el comportamiento de las baterías depende fuertemente de la temperatura de funcionamiento se realiza un análisis completo en el margen de temperatura comprendido entre los 5 °C y los 33 °C el cual satisface a la mayoría de las aplicaciones donde se utilizan estas baterías en regímenes cíclicos de carga-descarga.

- Se analiza la evolución de la tensión y de la temperatura, la aceptación de carga, la eficiencia energética y otros índices que permiten evaluar la influencia de los procesos de carga rápida en baterías de Ni-Cd y de Ni-MH de media y gran capacidad.
 - Una vez conocido el comportamiento durante la carga de las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH (especialmente durante carga rápida) se realiza un estudio de los márgenes de aplicación de la carga rápida en función de la relación entre el tiempo de carga, la capacidad descargada y la eficiencia energética, incremento de la temperatura, etc.
- En el capítulo 5 se hace un análisis crítico de los métodos empleados para cargar las baterías de Ni-Cd y de Ni-MH y, especialmente, de los criterios usados para la detección del instante de finalización de la carga. El resultado de este análisis evidencia la necesidad de diseñar un método de carga que sea capaz de finalizar con precisión la carga rápida de manera que no se produzcan sobrecargas a regímenes de carga elevados que degraden la batería o produzcan daños irreversibles en la misma. Para la realización del análisis de los métodos de carga y de finalización de carga se utilizaron los resultados obtenidos en el capítulo 4.
- Finalmente, otra de las principales aportaciones de este trabajo es la propuesta de un método de carga rápida a corriente constante y con finalización de la carga por la detección de hidrógeno, descrito en el capítulo 6. El método propuesto cumple con la mayoría de los requerimientos impuestos por el comportamiento de las tecnologías de baterías de Ni-Cd y de Ni-MH.

Las principales ventajas del método propuesto con respecto a los métodos de carga analizados en el capítulo 5 son:

- Evita el funcionamiento en la zona de sobrecarga.
- Es válido tanto para la tecnología de Ni-Cd como para la de Ni-MH.
- La capacidad suministrada a la batería se maximiza en relación con el tiempo que se requiere para realizar la carga.

- Es independiente del estado inicial de carga de la batería.
- Se detecta el instante en que se produce la sobrecarga de la batería independientemente de la temperatura de funcionamiento.
- Utilización de un único sensor de hidrógeno para detener la carga aún cuando existan varios módulos conectados en serie.
- Es preciso, fiable, sencillo y no es caro.
- Constituye una medida de protección adicional ya que evita altas concentraciones de hidrógeno en el ambiente.

Además, se puede concluir que la fiabilidad de este método de carga se ha comprobado en numerosos ciclos de carga-descarga a diferentes razones de carga (carga lenta y carga rápida) y en diferentes condiciones de temperatura tanto en baterías de Ni-Cd como en baterías de Ni-MH.

7.1 SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

En el transcurso de esta investigación han surgido nuevas ideas que merecen un estudio detallado en futuros trabajos por lo que se hacen las siguientes sugerencias:

1º) Realizar un trabajo más profundo acerca de la dispersión que se produce en el comportamiento de las baterías cuando se aumenta la razón de carga en grupos de monobloques. Existen aplicaciones donde se necesita interconectar un número elevado de módulos en serie como por ejemplo en los vehículos eléctricos que trabajan con una tensión nominal de 120 V y utilizan 20 módulos de 6 V conectados en serie.

Actualmente, el laboratorio de baterías dispone de un pequeño vehículo eléctrico de golf para pruebas de campo que se está empleando para estudiar el comportamiento de las baterías bajo condiciones de descarga no normalizadas, es decir sin el control preciso que permiten las condiciones ideales del laboratorio. Entre las principales características a estudiar se puede mencionar el comportamiento cuando la descarga no se produce a corriente constante y la batería se somete a los patrones de una carga real, condiciones de temperatura de funcionamiento no controladas, descargas no continuas, etc.

2º) Aplicar los resultados alcanzados a la obtención de un modelo preciso y fiable que emule el comportamiento de las baterías ante procesos de carga-descarga, especialmente cuando se las somete a carga rápida.

3º) Implementar el método desarrollado de carga rápida tanto desde el punto de vista de la etapa de potencia como del sistema de supervisión y control.

4º) Extender el estudio de comportamiento sobre carga rápida a la tecnología de litio-ión ya que se presenta como una tecnología de batería muy prometedora, utilizando para ello la metodología de ensayos desarrollada.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andreas Lohner, Eckhard Karden, Rik W. De Doncker
"Charge equalizing and lifetime increasing with a new charging method for VRLA batteries". International Telecommunications Energy Conference, INTELEC'97. 1997.
- [2] Anil Paryani, Blake Dickinson
"Battery management for fast charge systems". EVS-19. 2002.
- [3] Atsuo Kawamura, Takahiro Yanagihara
"State of charge estimation of sealed lead-acid batteries used for electric vehicles". IEEE. 1998.
- [4] B. J. Masserant, T. A. Stuart
"A maximum power transfer battery charger for electric vehicles". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Julio de 1997.
- [5] B. V. Ratnakumar, P. Timmerman, S. Di Stefano
"Simulation of temperature-compensated voltage limit curves for aerospace Ni-Cd batteries using a first principles' model". Journal of Power Sources. 1996.
- [6] Boris Tsenter, Menahem Anderman
"Common vessel monoblock design for sealed nickel-cadmium batteries". Journal of Power Sources. 1996.
- [7] C. A. Vicent, B. Scrosati. Arnold-John Wiley & Sons Inc.
"Modern batteries". Second edition. 1997.
- [8] C. Aguilar, F. Canales, J. Arau, J. Sebastian, J. Uceda
"An integrated battery charger/discharger with power-factor correction". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Octubre 1997.
- [9] C. C. Chan, K. T. Chau
"An overview of power electronics in electric vehicles". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Febrero de 1997.
- [10] C. Carballo, J. C. Viera, M. González, C. Blanco
"Sistema totalmente controlado para el ensayo de baterías basado en PC". SAAEI'00. 2000.

- [11] C.C. Chan, E.W. C.Lo, Shen Weixiang
"An overview of battery technology in electric vehicles". 1998.
- [12] Clive D. S. Tuck. Ellis Horwood.
"Modern battery technology". 1991.
- [13] Craig B. Toepfer
"Charge! EVs Power up for the long haul". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [14] D. A. J. Rand, R. Woods, R. M. Dell. John Wiley & Sons Inc.
"Batteries for electric vehicles". 1998.
- [15] D. Berndt. John Wiley & Sons Inc.
"Maintenance-free batteries". Second edition. 1997.
- [16] D. Coates, E. Ferreira, A. Charkey
"Development of a long cycle life sealed nickel-zinc battery for high energy-density applications". IEEE AES Systems Magazine. Junio de 1997.
- [17] David E. Reisner, Martin Klein
"Bipolar nickel-metal hydride battery for hybrid vehicles". IEEE AES Systems Magazine. Mayo de 1994.
- [18] David G. Vutetakis, Vilanayur V. Viswanathan
"Life expectancy of a 24-V, 15-Ah sealed lead-acid aircraft battery". IEEE AES Systems Magazine. Agosto de 1997.
- [19] David Hermance, Shoichi Sasaki
"Hybrid electric vehicles take to the streets". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [20] David Linden and Thomas B. Reddy. McGraw-Hill Handbooks
"Handbook of batteries". Third edition. 2002.
- [21] Deron K. Jackson, Aaron M. Schultz, Steven B. Leeb, y otros
"A multirate digital controller for a 1.5-kw electric vehicle battery charger". IEEE Transactions on Power Electronics. Noviembre de 1997.
- [22] Eckhard Karden, Peter Mauracher, Andreas Lohner
"Battery management system for energy-efficient battery operation: strategy and practical experience". EVS-13. Octubre de 1996.

- [23] Eckhard Karden, Stephan Buller, Rik W. De Doncker
"A method for measurement and interpretation of impedance spectra for industrial batteries". ISEA (LABAT' 99). 1999.
- [24] F. A. Fleming, P. Shumard, B. Dickinson
"Rapid recharge capability of valve-regulated lead-acid batteries for electric vehicle and hybrid electric vehicle applications". Journal of Power Sources. 1999.
- [25] F. Putois
"Market for nickel-cadmium batteries". Journal of Power Sources. 1995.
- [26] F. Schöpe
"Battery management system for nickel-cadmium batteries: concept and practical experience". EVS. 1994.
- [27] Fran Du Melle
"The global and urban environment: the need for clean power systems". Journal of Power Sources. 1998.
- [28] Fritz Kalhammer
"Batteries for electric vehicles". EPRI Journal. Marzo/Abril de 1996.
- [29] Fullera García, José.
"Acumuladores electroquímicos". McGraw-Hill. 1994.
- [30] G. M. Ehrlich, R. M. Hellen, C. Marsh Orndorh, T. A. Dougherty
"Prismatic Lithium-Ion batteries". IEEE AES Systems Magazine. Septiembre de 1997.
- [31] G. Pires, N. Honório, C. Lopes, U. Nunes, A. T Almeida
"Autonomous wheelchair for disabled people". ISIE' 97. 1997.
- [32] G. Tomazic
"Considerations regarding the comparison of traction batteries". IEEE AES Systems Magazine. Abril de 1994.
- [33] Gary L. Hunt
"The great battery search". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [34] Gary Loeber, Stephen P. Vukson
"Nickel-metal hydride (Ni-MH) technology evaluation for aircraft battery applications". IEEE AES Systems Magazine. Mayo de 1993.

- [35] Gary Purcell
"Faster charge may be on the way for electric lift trucks". EPRI Journal. Marzo/Abril de 1996.
- [36] Gaston Maggetto, Peter Van den Bossche
"Inductive automatic charging: the way to safe, efficient and user-friendly electric vehicle infrastructure". EVS-18. Berlin. 2001.
- [37] Henry Oman
"31st intersociety energy conversion engineering conference". IEEE AES Systems Magazine. Enero de 1997.
- [38] Henry Oman, Sid Gross
"Electric-vehicle batteries". IEEE AES Systems Magazine. Febrero de 1995.
- [39] J. C. Viera, C. Carballo, M. González, M. A. Pérez
"Estudio comparativo de nuevas tecnologías de baterías de media y alta capacidad. Algoritmos de carga rápida eficientes". SAAEI'99. 1999.
- [40] J. C. Viera, M. González, J. C. Campo, J. C. Álvarez, F. J. Ferrero
"Las baterías como fuente de energía del vehículo eléctrico". CIT 2002.
- [41] J. C. Viera, M. González, C. Carballo, C. Blanco
"An intelligent instrumentation system for testing fast-charging process in high-capacity batteries". IMTC'00. 2000.
- [42] J. C. Viera, M. González, C. Blanco, J.C. Álvarez
"Application range of fast-charging in Ni-Cd batteries". International Telecommunications Energy Conference, INTELEC'02. 2002.
- [43] J. C. Viera, M. González, C. Carballo, C. Blanco
"Sistema Totalmente Controlado para el Ensayo de Baterías Basado en PC". SAAEI'00. 2000.
- [44] J. C. Viera, M. González, J. C. Álvarez, M. A. Pérez
"Fast-charging capability of Ni-Cd batteries for electric vehicle applications". EVS19. 2002.
- [45] J. C. Viera, M. González, J. C. Campo, F. J. Ferrero
"Maximum fast charging rates in Ni-Cd batteries". ESPC'2002.
- [46] J. David
"Nickel-cadmium battery recycling evolution in Europe". Journal of Power

Sources. 1995.

- [47] J. N. Taylor
"Vantage, the ultra low maintenance Ni-Cd battery for communication applications". International Telecommunications Energy Conference, INTELEC'95. 1995.
- [48] J. P. Diard, B. Le Gorrec, C. Montella
"EIS study of electrochemical battery discharge on constant load". Journal of Power Sources. 1998.
- [49] J. W. Winckel, D. M. Rice
"Lead marked trends-technology and economics". Journal of Power Sources. 1998.
- [50] Jacobus M. Barnard, Jan A. Ferreira, Jacobus D. van Wyk
"Optimising sliding transformers for contactless power transmission systems". IEEE. 1995.
- [51] Jean-Pierre Cornu
"High performance nickel-cadmium cells for electric vehicle". SAFT Industrial Battery Group. Julio de 1994.
- [52] Jerry Mader
"Comercialization of Advanced Batteries". IEEE. 1996.
- [53] John G. Hayes, John T. Hall, Michael G. Egan, John M.D. Murphy
"Full-bridge, series-resonant converter supplying the SAE J-1773 electric vehicle inductive interface charging". IEEE. 1996.
- [54] John G. Hayes, Michael G. Egan
"A comparative study of phase-shift, frequency, and hybrid control of the series resonant converter supplying the electric vehicle inductive charging interface". IEEE. 1999.
- [55] John P. Nelson, William D. Bolin
"Basics and advances in battery systems". IEEE Transactions on Industry Applications. Marzo/Abril de 1995.
- [56] K. Joon
"Fuel cells - a 21st century power system". Journal of Power Sources. 1998.
- [57] K. Suzuki, K. Nishida, M. Tsubota
"Valve-regulated lead/acid batteries for electric vehicle: present and future".

- Journal of Power Sources. 1996.
- [58] K. W. Klontz, D.M. Divan, D.W. Novotny
"An actively cooled 120 kW coaxial winding transformer for fast charging electric vehicles". IEEE. 1994.
- [59] K. W. Klontz, D.M. Divan, D.W. Novotny, R.D. Lorenz
"Contactless power delivery system for mining applications". IEEE Transactions on Industry Applications. Enero/Febrero de 1995.
- [60] Katsunori Sugimori, Hiroki Nishimura, Koosuke Harada, Hiroshi Sakamoto, Kimiyoshi Morisaki
"A novel contact-less battery charger for electric vehicles". IEEE. 1998.
- [61] Keiichi Minamiura, Tadao Kimura, Kunio Kanamaru, Osamu Takahashi
"MATLAB® modeling of HEV Ni-MH battery pack system". EVS-19. 2002.
- [62] Kin-Pun Wong
"Battery management system for nickel metal hydride batteries". EVS-18 Berlin. 2001.
- [63] Ki-won Kim, Meung-ho Rhee, Chang-su Hahn
"Standardization of performance and establishment of test methods for EV batteries". EVS-19. 2002.
- [64] M. Bojrup, P. Karlsson, M. Alaküla, B. Simonsson
"A dual purpose battery charger for electric vehicles". IEEE. 1998.
- [65] M. González, J.C. Viera, J.C. Campo, M. A. Pérez
"El vehículo eléctrico: ¿Una alternativa?". CIT 2002. 2002.
- [66] M. González, M. A. Pérez, J. C. Viera, C. Carballo, A. Garrido
"A new, reliable and easily implemented Ni-Cd/Ni-MH battery state estimation method". IMTC'99. 1999.
- [67] M. González Vega
"Baterías para sistemas portátiles: imprescindibles y en constante evolución". ATE. 1997.
- [68] M. González Vega, Juan Díaz, José López, Miguel A. Pérez
"Sistemas de carga rápida para acumuladores de Ni-Cd y Ni-MH". Seminario Anual de Automática y Electrónica Industrial. SAAEI'94. 1994.
- [69] Marco S. W. Chan, K. T. Shau, C. C. Chan
"Modeling of electric vehicle chargers". IEEE. 1998.

- [70] Marcus Menne, Jürgen Reinert, Rik W. De Doncker
"Energy-efficiency evaluation of traction drives for electric vehicles". ISEA. 1998.
- [71] Michael J. Riezenman
"EV watch". IEEE Spectrum. Diciembre de 1997.
- [72] Michael J. Riezenman
"The EV future". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [73] Michael J. Riezenman
"The search for better batteries". IEEE Spectrum. Mayo de 1995.
- [74] Morton Blatt, John Kesselring
"Persistence pays". EPRI Journal. Noviembre/Diciembre de 1998.
- [75] Naoki Kato, Tsutomu Ogata, Toshiro Hirai, Harumi Hirota
"Using a pulse-current technique and measured resistance to evaluate the capacity of trickle-charged nickel/cadmium cells". Journal of Power Sources. 1997.
- [76] Nasser H. Kutkut, Keith W. Klontz
"Design considerations for power converters supplying the SAE J - 1773 electric vehicle inductive coupler". IEEE. 1997.
- [77] Nasser H. Kutkut, M. Divan, Donald W. Novotny, Raymond H. Marion
"Design considerations and topology selection for a 120-kW IGBT converter for EV fast charging". IEEE Transactions on Power Electronics. Enero de 1998.
- [78] O. A. Petri, B. B. Damaskín
"Fundamentos de la electroquímica teórica". Editorial MIR. 1981.
- [79] P.T. Moseley
"Research results from the advanced lead-acid battery consortium point the way to longer life and higher specific energy for lead/acid electric-vehicle batteries". Journal of Power Sources. 1998.
- [80] Paul A. Scardaville, B. C. Newman
"High power vented nickel cadmium cells designed for ultra low maintenance". IEEE AES Systems Magazine. Mayo de 1993.
- [81] Paul Gifford, John Adams, Dennis Corrigan, Srinivasan Venkatesan
"Development of advanced nickel/metal hydride batteries for electric and hybrid vehicle". Journal of Power Sources. 1999.

- [82] Paul Ruetschi, Felix Meli, Johann Desilvestro
"Nickel-metal hydride batteries. The preferred batteries of the future?".
 Journal of Power Sources. 1995.
- [83] R. F. Nelson
"Valve-regulated lead/acid battery designs and charging strategies- are they linked?". Journal of Power Sources. 1998.
- [84] Robert C. Stempel, Stanford R. Ovshinsky, Paul R. Gifford, Dennis A. Corrigan
"Nickel-metal hydride: ready to serve". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [85] Robert Rynkiewicz
"Discharge and charge modeling of lead acid batteries". APEC'99. 1999.
- [86] Ronald H. Wolk
"Fuel cells for homes and hospitals". IEEE Spectrum. Mayo de 1999.
- [87] Saft Nife
"Nickel-cadmium block battery. Technical manual".
- [88] Serguei N. Lvov, Digbi D. Macdonald
"Thermodynamic behavior of Ni-Cd and Ni-H₂ batteries over wide ranges of temperatures (0-200°C), KOH concentrations (0.1-20 mol kg⁻¹) and H₂ pressure (0.1- 500bar)". Journal of Power Sources. 1998.
- [89] Stephan Buller, Eckhard Karden, Andreas Lohner, Rik W. De Doncker
"LabVIEW-Based universal battery monitoring and management system". IEEE. 1998.
- [90] T. R. Crompton. Newnes
"Battery reference book". Third edition. 2000.
- [91] Technical Marketing Staff of Gates Energy Products, Inc.
"Rechargeable batteries. Applications handbook". 1992.
- [92] Tien Q. Duong, Raymond A. Sutula, James A. Barners, Connie Bezanson y otros
"FY 2002 status report on the U.S. department of energy electric and hybrid electric vehicle energy storage technologies research". EVS-19. 2002.

- [93] Timothy M. Kulin
"Life Cycle Testing of a Sealed 24-V, 42-Ah nickel-cadmium aircraft battery". IEEE AES Systems Magazine. Octubre de 1997.
- [94] Tom Gilchrist
"Fuel cells to the fore". IEEE Spectrum. Noviembre de 1998.
- [95] Tomohiko Ikeya, Mutsumi Iwasaki, Sakae Takagi, otros
"Collaborative investigation on charging electric-vehicle battery systems for night-time load leveling by japanese electric power companies". Journal of Power Sources. 1997.
- [96] Uwe Köhler
"Nickel metal hydride batteries for electric vehicles and new vehicle power supply systems". 18th International Electric Vehicle Symposium. Octubre de 2001.
- [97] William A. Lynch, Ziyad M. Salameh
"Realistic electric vehicle battery evaluation". IEEE Transactions on Energy Conversion. 1997.
- [98] Wolfgang Bögel, Jean Pierre Büchel, Hélène Katz
"Real-Life EV battery cycling on the test bench". Journal of Power Sources. 1998.
- [99] Wolfgang Warthmann
"New maintenance free nickel-cadmium-traction-batteries in fibre technology". IEEE AES Systems Magazine. Mayo de 1993.
- [100] Yoshio Nishi, K. Katayama, J. Shigetomi, H. Hideaki
"The development of lithium-ion secondary battery systems for EV and HEV". Annual Battery Conference on Applications and Advances. Enero de 1998.
- [101] *"Frequently asked questions about electric vehicles"*. Internet. 1996.
- [102] *"SAFT y el vehículo eléctrico"*. DYNA. Enero/Febrero de 1993.
- [103] *"Nueva generación de baterías de gran capacidad para vehículos eléctricos"*. DYNA. Enero/Febrero de 1993.
- [104] Manuela González Vega. Universidad de Oviedo
"Carga rápida y ultrarrápida de acumuladores de Ni-Cd y de Ni-MH: estudio y desarrollo de nuevos métodos". Tesis Doctoral. Enero de 1998.

- [105] Agilent Technologies
"Unidad de adquisición de datos/Conmutación de datos. HP34970A". Guía del Usuario. Septiembre de 1997.
- [106] Agilent Technologies
"Electronic load mainframes. Model 6050A". Operating Manual. Octubre de 1997.
- [107] Fluke Corporation
"Hydra data acquisition unit. 2645A". Users Manual. Octubre de 1990.
- [108] Hewlett Packard
"HP-IB DC Power supplies. HP models 667xA and 668xA". Operating Guide. Marzo de 1995.
- [109] National Instruments Corporation
"NI-488.2™ User manual for Windows". Enero de 1996.
- [110] National Instruments Corporation
"LabVIEW User manual". Enero de 1998.
- [111] SAFT Industrial Battery Group
"Technical handbook: installation, operation and maintenance of air cooled Ni-Cd block units type STM 5.100, STM 5.140 and STM 5.180". Enero de 1995.
- [112] SAFT Industrial Battery Group
"User's manual for NH12.4 Nickel - Metal hydride module". Octubre de 2001.
- [113] Sorensen
"DHP Series power supply". Operating Manual. 1997.
- [114] United States Advanced Battery Consortium (USABAC)
"Electric vehicle battery test procedures manual". Enero de 1996.
- [115] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)
"Proceedings of the OECD workshop on the effective collection and recycling of the nickel-cadmium batteries ". OECD Environmental Health and Safety Publications. Series on Risk Management N°8. Septiembre de 1997.
- [116] Francisco Morís Martín. Universidad de Oviedo
"Banco de ensayos en LabVIEW con distribución de resultados a través de Internet". Proyecto de fin de carrera. Área de Tecnología Electrónica. 2002.

- [117] Pablo Álvarez Fernández. Universidad de Oviedo
“Entorno gráfico bajo Windows para la gestión y tratamiento de datos en ensayos automatizados”. Proyecto de fin de carrera. Área de Tecnología Electrónica. 2000.
- [118] Carlos Carballo Manuel. Universidad de Oviedo
“Diseño de un banco de ensayos universal de baterías mediante bus normalizado GPIB bajo entorno LabVIEW”. Proyecto de fin de carrera. Área de Tecnología Electrónica. 1999.