

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 743 055**

51 Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.07.2016 PCT/EP2016/066206**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.01.2017 WO17005883**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2016 E 16741563 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 3320461**

54 Título: **Procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico y programa**

30 Prioridad:

09.07.2015 FR 1556500

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

18.02.2020

73 Titular/es:

**SORBONNE UNIVERSITÉ (50.0%)
21, rue de L'École de Médecine
75006 Paris, FR y
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**DRON, WILFRIED;
HACHICHA, KHALIL y
GARDA, PATRICK**

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 743 055 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico y programa.

5 **Dominio de la invención**

La presente invención se refiere a un procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico que consta de por lo menos una batería y de un componente electrónico funcional. La presente invención se aplica, en particular, a la simulación de sistemas incorporados de comunicación y, especialmente, a las redes de sensores inalámbricos.

Estado de la técnica

La simulación del funcionamiento de un circuito electrónico que consta de por lo menos una batería puede resultar útil, en especial, para estimar la autonomía energética de un circuito electrónico, definida como el tiempo durante el cual el circuito electrónico funciona sin deficiencias de una de sus funciones principales ligadas al agotamiento de la batería que lo alimenta. El agotamiento se considera, en este caso, como un nivel de energía de la batería insuficiente para mantener el sistema en servicio.

Se conocen simuladores de simulación continua, en los que el tiempo simulado se segmenta en pasos iguales. En cada paso de tiempo, se vuelven a evaluar todos los parámetros del modelo, incluyendo en instantes en los que no se produce ningún evento, lo cual hace que aumente considerablemente el tiempo de simulación.

Se conocen simuladores de eventos discretos, en los cuales los parámetros del modelo se vuelven a evaluar únicamente cuando se produce un evento. Un evento es, típicamente, un cambio de estado de funcionamiento de un componente electrónico funcional del circuito. La simulación de eventos discretos permite no tener que volver a evaluar todos los parámetros del modelo en instantes en los que estos parámetros varían poco.

Sin embargo, una batería no tiene siempre un comportamiento lineal. En particular, cuando la corriente entregada por la batería es superior a la corriente nominal de la batería, la capacidad residual de la batería varía de manera no lineal con respecto a la corriente entregada, tal como se ilustra en la figura 1. La figura 1 representa la capacidad extraíble realmente de la batería CR2032 de Panasonic en función de la corriente consumida por la carga.

Los simuladores de eventos discretos no permiten, en general, tener en cuenta las variaciones rápidas de los parámetros del modelo en régimen de funcionamiento no lineal de la batería.

En efecto, si ningún componente electrónico funcional cambia de estado de funcionamiento, no se produce ningún evento y los parámetros del modelo no se vuelven a evaluar. No obstante, si la batería se encuentra en su zona de funcionamiento no lineal, los parámetros del sistema pueden evolucionar de manera muy rápida sin que los parámetros del modelo se vuelvan a evaluar, lo cual puede conducir a errores de simulación importantes.

El artículo de W. Dron *et al.* "A Fixed Frequency Sampling Method for Wireless Sensors Power Consumption Estimation", *11th International New Circuits and Systems Conference*, junio de 2013, páginas 1 a 4, propone un modelo numérico para simular y estimar de manera fiel la batería y el consumo energético de los componentes de una red de sensores utilizando un muestreo de frecuencia fija.

Exposición de la invención

Es un objetivo de la invención proponer un procedimiento de simulación que permita simular de manera precisa el funcionamiento no lineal de una batería y del sistema alimentado por la misma, aunque limitando el volumen de cálculo necesario. Este objetivo se logra, en el marco de la presente invención, gracias a un procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico implementado por ordenador, comprendiendo el circuito electrónico por lo menos una batería y un componente electrónico funcional alimentado por la batería, modelizándose el circuito electrónico mediante un modelo numérico en el cual:

- la batería presenta dos estados de funcionamiento, que incluyen un estado de funcionamiento casi lineal según el cual una capacidad residual de la batería varía de manera casi lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería, y un estado de funcionamiento no lineal según el cual la capacidad residual de la batería varía de manera no lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería,

- el componente electrónico funcional presenta varios estados de funcionamiento, correspondiéndose cada estado de funcionamiento con una corriente instantánea consumida por el componente eléctrico,

comprendiendo el procedimiento etapas sucesivas que consisten en actualizar parámetros del modelo, incluyendo los parámetros una capacidad residual en curso de la batería $C_R(t)$, una corriente instantánea

entregada $i_{entregada}(t)$ por la batería, un valor en curso de resistencia interna de la batería, y una tensión de alimentación en curso de la batería $V(t)$, ejecutándose la etapa de actualización:

- 5
- periódicamente, en un intervalo de tiempo simulado predefinido cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal, y
 - en cada cambio de estado de funcionamiento de uno de los componentes electrónicos funcionales, cuando la batería está en estado de funcionamiento casi lineal.

10 El procedimiento de simulación propuesto permite ajustar la frecuencia de las actualizaciones de los parámetros del modelo en función de la precisión buscada. Cuando la batería se comporta de manera lineal, las actualizaciones tienen lugar únicamente cuando un componente electrónico funcional cambia de estado de funcionamiento. Cuando la batería se comporta de manera no lineal, los parámetros del modelo se actualizan periódicamente, lo cual permite restituir fielmente todas las alinealidades de la batería.

15 Por tanto, el procedimiento de simulación propuesto permite tener en cuenta, por un lado, la estructura particular del circuito electrónico considerado que conlleva cambios de estado de funcionamiento de los componentes funcionales del circuito electrónico, y, por otro lado, las variaciones rápidas de los parámetros del sistema cuando la batería está en régimen de funcionamiento no lineal.

20 La invención se completa, ventajosamente, con las siguientes características, consideradas individualmente o en una cualquiera de sus combinaciones técnicamente posibles.

25 La etapa de actualización se ejecuta periódicamente, a intervalos de tiempo constantes, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal.

La etapa de actualización se ejecuta periódicamente, a intervalos de tiempo variables de duración inversamente proporcional al valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal.

30 El componente electrónico funcional se modeliza con un modelo de componente electrónico funcional que tiene por lo menos, como parámetro, una corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$.

35 La batería se modeliza con un modelo de batería que tiene por lo menos como parámetro una tensión de alimentación $V(t)$, una corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, y una capacidad residual $C_R(t)$.

El modelo de componente electrónico funcional y el modelo de batería tienen, además, como parámetro, una temperatura del componente y una temperatura de la batería.

40 El procedimiento de simulación consta de las etapas siguientes:

- comparar la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ por la batería con un valor umbral correspondiente a la corriente nominal de la batería;
- 45 - si la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ es inferior a la corriente nominal de la batería, actualizar los parámetros del modelo, en el transcurso de la etapa de actualización de los parámetros del modelo, en el instante correspondiente al próximo cambio de modo del componente electrónico funcional;
- 50 - si la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ es superior a la corriente nominal de la batería, actualizar los parámetros del modelo, en el transcurso de la etapa de actualización de los parámetros del modelo, en el instante siguiente, separado de un instante en curso por el paso de tiempo.

La etapa de actualización de los parámetros del modelo (E5, E5'') consiste en actualizar los parámetros del modelo que consta de las siguientes subetapas:

- 55
- actualizar los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t_i)$ de los diferentes componentes funcionales en función del valor precedente de la tensión de alimentación $V(t_{i-1})$ y del estado en curso del componente funcional;
 - 60 - actualizar el valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t_i)$ en función de los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t_i)$ de los diferentes componentes funcionales;
 - actualizar el valor de la capacidad residual $C_R(t_i)$ en función del valor precedente de la capacidad residual $C_R(t_{i-1})$, del valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t_i)$ y del tiempo transcurrido Δt desde la última actualización;
- 65

- actualizar el valor de la resistencia interna $r(t)$ de la batería en función del valor actualizado de la capacidad residual de la batería $C_R(t)$;
- actualizar el valor de la tensión de alimentación $V(t)$ en función del valor actualizado de la capacidad residual de la batería $C_R(t)$ y del valor actualizado de la resistencia interna de la batería.

El valor actualizado de la capacidad residual $C_R(t_i)$ se calcula según la ecuación:

$$C_R(t_i) = C_R(t_{i-1}) - (i_{eq}(t_i) \times \Delta t), \text{ siendo } i_{eq}(t) = \frac{C_{nominal}}{C_{ef}(i_{entregada}(t))} \times i_{entregada}(t),$$

siendo:

$\Delta t = t_i - t_{i-1}$, siendo t_i el instante de dicha actualización y t_{i-1} el instante de la actualización precedente;
 $C_{nominal}$ es la capacidad nominal de la batería;
 $C_{ef}(i(t))$ es la capacidad efectiva de la batería.

El modelo comprende una función de control del tiempo simulado, que define los estados de funcionamiento de los componentes electrónicos funcionales e instantes de cambio de estados de funcionamiento, desde el tiempo de inicio de la simulación hasta un tiempo final, constanding, además, el procedimiento, de una etapa (E6), después de cada etapa de actualización de los parámetros (E5, E5'), de actualización de la función de control del tiempo.

Las etapas de actualización de los parámetros del modelo se repiten hasta que la tensión en los terminales de la batería $V(t)$ sea inferior a un valor umbral predefinido que se corresponde con la tensión de corte de la batería, o hasta que la capacidad residual de la batería $C_R(t)$ sea inferior a un valor umbral predefinido.

La invención propone, también, un procedimiento de determinación de la autonomía energética de una batería en un circuito electrónico que comprende por lo menos una batería y un componente electrónico funcional alimentado por la batería, consistente en simular el funcionamiento del circuito electrónico, según un procedimiento acorde a la reivindicación 11, determinándose la autonomía energética de la batería como igual a la duración comprendida entre el instante correspondiente al inicio de la simulación y el instante correspondiente a la finalización de la simulación.

La invención propone, también, un producto de programa informático que comprende instrucciones de código de programa para la ejecución de las etapas del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

Descripción de las figuras

Se pondrán de manifiesto otros objetivos, características y ventajas a partir de la descripción detallada que viene a continuación, en referencia a los dibujos ofrecidos a título ilustrativo y no limitativo, entre los cuales:

- la figura 1 representa la curva de descarga de una batería, es decir su capacidad efectiva en función de la carga;
- la figura 2a representa esquemáticamente un modelo de un componente electrónico funcional;
- la figura 2b representa esquemáticamente una parte funcional del modelo de componente electrónico funcional;
- la figura 2c representa esquemáticamente una parte de simulación de consumo del modelo de componente electrónico funcional;
- la figura 3 representa esquemáticamente un modelo de batería;
- la figura 4 representa esquemáticamente las diferentes etapas del procedimiento de simulación según la invención;
- la figura 5 ilustra un ejemplo de realización del procedimiento;
- la figura 6 representa esquemáticamente un modo de realización de la invención en el cual los parámetros se actualizan de manera iterativa.

Descripción detallada de la invención

En un procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico, el circuito electrónico se modeliza mediante un modelo numérico.

5

En este modelo numérico, la batería se modeliza con un modelo de batería y los componentes electrónicos funcionales con un modelo de componente electrónico funcional.

Modelo de componente electrónico funcional

10

Un componente electrónico funcional es un componente electrónico destinado a ensamblarse con otros con el fin de realizar una o varias funciones electrónicas. Los componentes constituyen tipos y categorías muy numerosos. Se caracterizan, en especial, por su función y su consumo.

15

Para modelizar de la mejor manera posible el funcionamiento de un componente electrónico funcional, el modelo de componente electrónico funcional incluye, por lo menos, como parámetros, una corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$, y una tensión de alimentación $V(t)$ del componente.

20

Los componentes electrónicos funcionales tienen varios estados de funcionamiento.

A cada estado de funcionamiento le corresponde una configuración específica de los elementos integrados en el circuito. Se obtiene como resultado, por tanto, un consumo específico en cada estado de funcionamiento.

25

Para modelizar este fenómeno, el modelo de componente electrónico funcional se define de manera que presenta varios estados de funcionamiento, correspondiéndose cada estado de funcionamiento con una corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$.

30

Los componentes más sencillos no pueden tener más que dos estados de funcionamiento, el estado activo u "ON" en el cual la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ es diferente de cero, y el estado inactivo u "OFF" en el cual la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ es cero.

35

Los componentes más complejos tienen otros estados de funcionamiento, como el estado de consumo reducido, "Low Power", en el cual el componente está activo sin ejecutar tarea alguna, y para el cual la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ es menor que para el estado activo.

40

Por ejemplo, un microcontrolador de frecuencia de funcionamiento variable (función conocida con la denominación "Dynamic Voltage Frequency Scaling"), puede funcionar a diferentes frecuencias de funcionamiento que tienen consumos diferentes. En el modelo de microcontrolador de frecuencia de funcionamiento variable, con cada frecuencia de funcionamiento está asociado un estado de funcionamiento distinto, correspondiéndose cada estado de funcionamiento con un valor de corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$. Así, un microcontrolador que dispone de tres niveles de frecuencia f_1 , f_2 , y f_3 , se modelizará con un modelo de componente funcional de tres estados de funcionamiento Activo- f_1 , Activo- f_2 y Activo- f_3 , correspondiéndose cada estado de funcionamiento con un valor de corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$.

45

Tal como se ilustra en la figura 2a, un componente electrónico funcional se modeliza mediante un modelo de componente electrónico funcional 2 que consta de una parte funcional 21 que modeliza el funcionamiento del componente, y de una parte de simulación del consumo 22 que modeliza su consumo y su comportamiento con respecto a su tensión de alimentación.

50

La figura 2b es una representación esquemática de la parte funcional 21 de un componente funcional. La parte funcional del modelo modeliza el comportamiento del componente electrónico funcional sobre los datos que el mismo trata o genera. Así, la parte funcional del modelo de un convertor analógico digital consistirá, por ejemplo, en convertir una señal analógica en señal digital teniendo en cuenta su frecuencia de muestreo, su precisión, su resolución y cualquier otro parámetro significativo y necesario para el grado de precisión deseado. La manera según la cual se modelizan la función o funciones del componente depende de la naturaleza del componente. Las funciones de un núcleo de microcontrolador se pueden reproducir, por ejemplo, con la ayuda de un emulador. Por su parte, un dispositivo de radiocomunicaciones o un convertor se pueden describir con la ayuda de máquinas de estados. Finalmente, la función de un sensor se describirá con la ayuda de una ecuación que representa su ley de conversión. La modelización del comportamiento del componente con respecto a sus entradas-salidas se denomina, aquí, función.

55

La gestión de los estados de funcionamiento del componente se puede representar mediante una máquina de estados o cualquier otra representación que describa una cadena de estados y las condiciones asociadas a estos cambios.

60

La figura 2c es una representación esquemática de la parte de simulación del consumo 22 de un componente

65

funcional. La parte 22 modeliza el consumo del componente teniendo en cuenta su estado de funcionamiento, su tensión de alimentación y la temperatura.

La parte de simulación del consumo del modelo simula la intensidad instantánea consumida por el componente.

La parte de simulación del consumo del modelo de un convertor analógico/digital reproduce, por ejemplo, el consumo asociado a la conversión de una señal analógica dada teniendo en cuenta sus valores de consumo en las condiciones dadas de tensión de alimentación y de temperatura.

Cuando una de las partes 21 o 22 del modelo detecta un cambio de estado de funcionamiento, comunica a la otra parte del modelo el estado nuevo de funcionamiento con el fin de garantizar la sincronización de las dos partes 21 y 22 del modelo. Por ejemplo, en el caso en el que la tensión de alimentación no sea suficiente para garantizar el funcionamiento del componente, la parte de simulación del consumo del modelo 22 transmite el estado funcional inactivo a la parte funcional 21. En el caso en el que la parte funcional 21 cambia de estado de funcionamiento, este estado nuevo es transmitido a la parte de simulación del consumo 22 con el fin de que la misma adopte el valor de consumo adecuado.

Modelo de batería

Una batería se considera como un conjunto de acumuladores eléctricos conectados entre ellos a fin de crear un generador eléctrico de tensión y de capacidad deseada.

La capacidad de una batería es la cantidad de carga eléctrica almacenada para un potencial eléctrico dado. Se define como la suma de las cargas eléctricas de un elemento dividida por el potencial de este elemento.

Contrariamente a las fuentes de alimentación estabilizadas o ideales, las baterías tienen una capacidad limitada. Esta capacidad varía esencialmente en función de los compuestos químicos utilizados en el electrolito (por ejemplo: iones de litio, níquel-cadmio, cinc-ácido, etc.) y del factor de forma de la batería (por ejemplo, CR2032, AA, AAA, etc.).

De una manera general, la capacidad de una batería se denomina capacidad nominal cuando la batería está completamente cargada. Cuando la capacidad de una batería ya ha sido utilizada en parte, a la capacidad restante se le denomina capacidad residual o restante. Ya sea nominal o residual, la capacidad de una batería se expresa en A.h o en W.h.

Por otra parte, la tensión de alimentación de las baterías varía en el transcurso de su descarga. En efecto, cuanto más se descarga la batería, menos importante será el número de cargas transferibles disponibles. La consecuencia directa es que el potencial eléctrico de la batería (que no es otro más que su tensión de alimentación) disminuirá a medida que disminuye la capacidad residual. La manera con la que varía esta tensión de alimentación depende, nuevamente en este caso, de la estructura interna de la batería.

Por otra parte, la totalidad de la capacidad nominal de una batería no está necesariamente disponible. Considerando una descarga continua, si el valor de la corriente consumida por la carga es superior al valor de la corriente nominal, entonces, no será accesible toda la capacidad de la batería. La parte accesible de la capacidad nominal de una batería se denomina capacidad efectiva. La proporción de la capacidad accesible depende de la corriente instantánea sustraída por la carga, de la temperatura a la cual se encuentra la batería y, tal como anteriormente, de las características intrínsecas de la batería.

La corriente nominal de una batería se define como la corriente más allá de la cual el comportamiento de la batería se vuelve no lineal.

La observación de las características de descarga de una batería permite definir dos modos de funcionamiento principales (tal como se ilustra en la figura 1).

La batería presenta un primer estado de funcionamiento y un segundo estado de funcionamiento. El primer estado de funcionamiento se califica como "casi lineal", por oposición al segundo estado de funcionamiento el cual se califica como "no lineal". El calificativo "casi lineal" significa solamente que la batería presenta un comportamiento más próximo a un comportamiento lineal en el estado de funcionamiento "casi lineal" que en el estado de funcionamiento "no lineal".

Cuando la corriente instantánea suministrada por la batería a la carga es inferior a la corriente nominal, la batería está en una zona de funcionamiento casi lineal, en la cual la capacidad residual de la batería varía de manera casi lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería.

Cuando la corriente instantánea suministrada por la batería a la carga es superior a la corriente nominal, la batería está en una zona de funcionamiento no lineal, en la cual la capacidad residual de la batería varía de manera no

lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería.

Para modelizar de la mejor manera el funcionamiento de una batería, tal como se ilustra en la figura 3, el modelo de la batería incluye por lo menos como parámetro una capacidad residual en curso de la batería $C_R(t)$, una corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, y una tensión de alimentación $V(t)$ de la batería.

Además, el modelo de batería presenta dos estados de funcionamiento, que incluyen un estado de funcionamiento casi lineal según el cual una capacidad residual de la batería varía de manera casi lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería, y un estado de funcionamiento no lineal según el cual la capacidad residual de la batería varía de manera no lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería.

Control del tiempo simulado

Una función de control del tiempo simulado gestiona el avance cronológico del tiempo simulado, desde el tiempo de inicio de la simulación hasta su tiempo de finalización.

La función de control del tiempo mantiene actualizado permanentemente un calendario o lista de los eventos, en los que están registrados los instantes de los eventos.

Un cambio de estado de funcionamiento de un componente funcional se considera como evento.

Para calcular el instante del evento siguiente, es necesario buscar el instante del evento más próximo al instante en curso.

La figura 4 ilustra las diferentes etapas del procedimiento de simulación, acorde a un modo de realización de la invención.

En una primera etapa E1, el usuario define los parámetros de inicialización del modelo tales como la capacidad nominal de la batería, la tensión de corte de cada componente, el consumo de cada componente en función de su modo de funcionamiento, etcétera.

En una segunda etapa E2, el simulador calcula los valores de los otros parámetros iniciales del modelo a partir de los parámetros de inicialización.

En una tercera etapa E3, el simulador verifica, por un lado, si la tensión en los terminales de la batería es inferior a un valor umbral predefinido que se corresponde con la tensión de corte, y, por otro lado, si la capacidad residual es inferior a un valor umbral predefinido que puede ser cero.

Si se cumple una de estas condiciones, se detiene la simulación. El intervalo comprendido entre el instante correspondiente al inicio de la simulación, y el instante correspondiente a la finalización de la simulación es igual a la autonomía energética de la batería.

Si no se cumple ninguna de estas condiciones, la simulación continúa.

En una cuarta etapa E4, el simulador verifica si la corriente entregada por la batería es superior a su corriente nominal.

Si la corriente instantánea es inferior a la corriente nominal de la batería, el procedimiento de simulación actualiza, en el transcurso de una etapa E5, los parámetros del modelo en el instante correspondiente al próximo cambio de estado de uno de los componentes electrónicos funcionales. A este efecto, la función de control busca el instante del evento más próximo al instante presente en la lista de los eventos futuros.

Si la corriente instantánea es superior a la corriente nominal de la batería, el procedimiento de simulación calcula el valor del paso de tiempo $T_{sampling}$ en el transcurso de la etapa E5' y a continuación actualiza, en el transcurso de una etapa E5'', los parámetros del modelo en el instante $t + T_{sampling}$, separado del instante en curso t por el paso de tiempo $T_{sampling}$ (denominado también periodo de refresco).

El valor del paso de tiempo $T_{sampling}$ determinado en el transcurso de la etapa E5' puede ser constante o se puede ajustar en función del grado de alinealidad de la batería. En caso de ajuste, cuanto mayor sea la corriente instantánea ante la corriente nominal de la batería, más pequeño será el paso de tiempo $T_{sampling}$. En especial, la duración del intervalo de tiempo puede ser inversamente proporcional al valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal.

Por otra parte, cuando un componente cambia de modo de funcionamiento, la corriente que consume el mismo también varía. Esto conlleva una variación de la tensión de alimentación de la batería que implicará una variación

de la corriente consumida por todos los componentes alimentados por la batería.

Tal como se ilustra en la figura 6, los parámetros del modelo se actualizan, entonces, de manera iterativa para hacer converger el par tensión de alimentación de la batería y corriente consumida por el componente.

5 Las iteraciones llegan a su fin cuando se cumple una de las tres condiciones siguientes: 1) cuando el número de iteraciones alcanza un valor N_{max} (10 iteraciones, por ejemplo), 2) cuando la diferencia entre dos valores de tensiones de alimentación de la batería calculados durante dos iteraciones sucesivas es inferior a un umbral $dV(t)$ (0.1% de la tensión de alimentación nominal de la batería, por ejemplo), 3) cuando la diferencia entre dos valores de corriente consumida por el componente, calculados durante dos iteraciones sucesivas, es inferior a un umbral $di(t)$ (0.1% de la corriente nominal de la batería, por ejemplo).

Las iteraciones se efectúan en el transcurso de las etapas E5" y E5.

15 En una etapa E7, el simulador verifica si el próximo evento está previsto antes del instante $t + T_{sampling}$. Si es así, el procedimiento de simulación actualiza, en el transcurso de una etapa E5, los parámetros del modelo en el instante correspondiente al próximo cambio de estado de uno de los componentes electrónicos funcionales.

20 Si la corriente instantánea es inferior a la corriente nominal de batería, el procedimiento de simulación actualiza, en el transcurso de una etapa E5, los parámetros del modelo en el instante correspondiente al próximo cambio de estado de uno de los componentes electrónicos funcionales. A este efecto, la función de control busca el instante del evento más próximo al instante presente en la lista de los eventos futuros.

Consecuentemente, la etapa de actualización se ejecuta:

- 25
- periódicamente, a un intervalo de tiempo variable o constante, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal, estando la batería en estado de funcionamiento no lineal cuando la corriente instantánea es superior a la corriente nominal de la batería; y
 - 30 - en cada cambio de estado de funcionamiento de uno de los componentes electrónicos funcionales, cuando la batería está en estado de funcionamiento casi lineal, estando la batería en estado de funcionamiento casi lineal cuando la corriente instantánea es inferior o igual a la corriente nominal de la batería.

35 Así, el procedimiento permite ajustar la frecuencia de las actualizaciones de la batería en función de la precisión requerida. Cuando la batería se comporta de manera lineal, las actualizaciones tienen lugar únicamente cuando un componente cambia de estado. En el caso inverso, si la batería se comporta de manera no lineal, las actualizaciones tienen lugar en un intervalo de tiempo definido por el paso (denominado, también, periodo de refresco) $T_{sampling}$ con el fin de restituir de manera fiel todas las alinealidades de la batería.

40 Las etapas E5 y E5' que consisten en actualizar parámetros del modelo comprenden las siguientes subetapas:

- actualizar los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ de los diferentes componentes funcionales en función del valor precedente de la tensión de alimentación $V(t_{i-1})$ y del estado en curso del componente funcional;
- 45 - actualizar el valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ en función de los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ de los diferentes componentes funcionales;
- 50 - actualizar el valor de la capacidad residual $C_R(t)$ en función del valor precedente de la capacidad residual $C_R(t_{i-1})$, del valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ y del tiempo transcurrido Δt desde la última actualización;
- actualizar el valor de la tensión de alimentación $V(t)$ en función del valor actualizado de la capacidad residual de la batería $C_R(t)$.

55 El valor actualizado de la capacidad residual $C_R(t)$ se calcula, típicamente, según la ecuación:

$$C_R(t_i) = C_R(t_{i-1}) - (i_{eq}(t_i) \times \Delta t), \text{ siendo } i_{eq}(t) = \frac{C_{nominal}}{C_{ef}(i(t))} \times i_{entregada}(t),$$

60 siendo:

$\Delta t = t_i - t_{i-1}$, siendo t_i el instante de dicha actualización y t_{i-1} el instante de la actualización precedente;
 $C_{nominal}$ se corresponde con la capacidad nominal de la batería;
 $C_{ef}(i(t))$ se corresponde con la capacidad efectiva de la batería.

65

Típicamente, el valor de tensión de alimentación $V(t)$ se calcula según la ecuación:

$$V(t_i) = (V_{nominal} \times f(C_R)(t_i)):$$

5 correspondiéndose f con una función de interpolación polinómica de grado variable, determinada a partir de la documentación del fabricante de la batería. Por ejemplo, para una pila de tipo AA, de marca Duracell®, de modelo MN1500 y de componentes químicos alcalinos de manganeso, esta función queda definida por la siguiente relación:

$$10 \quad f(C_R(t_i)) = 1,0658 \times C_R(t_i)^3 - 1,877 \times C_R(t_i)^2 + 1,292 \times C_R(t_i) + 0,5066$$

Correspondiéndose $V_{nominal}$ con la tensión nominal de la batería.

15 Como la resistencia interna de la batería $r(C_R)$ se tiene en cuenta, la tensión de alimentación $V(t)$ se actualiza en función del valor nuevo de la capacidad residual $C_R(t)$ y el valor de la intensidad consumida instantánea $i(t)$, típicamente según la ecuación:

$$V(t_i) = (V_{nominal} \times f(C_R(t_i)) - (i(t_i) \times r(C_R)).$$

20 La actualización de los parámetros puede modificar la lista de los eventos futuros y, en especial, crear otros eventos. Por ello, en el transcurso de una sexta etapa E6, después de cada actualización de los parámetros, la función de control actualiza la lista de los eventos futuros previstos.

25 La figura 5 ilustra un ejemplo de realización del procedimiento, para un circuito electrónico, que comprende una sola batería y un solo componente electrónico funcional. Se supone que, en el estado activo ON, la corriente instantánea entregada por la batería $i_{entregada}(t)$ es superior a la corriente nominal, y que, en el estado de espera LOW POWER, la corriente instantánea entregada por la batería $i_{entregada}(t)$ es cero.

30 En el instante 0, el componente electrónico funcional pasa del estado inactivo OFF al estado activo ON. Este cambio de estado funcional constituye un evento. El simulador actualiza los parámetros del modelo en el instante 0.

35 Al estar en el estado activo ON el componente electrónico funcional, la corriente instantánea entregada por la batería $i_{entregada}(t)$ es superior a la corriente nominal. La próxima actualización de los parámetros se realizará, por tanto, en el instante $t=0+T_{sampling}$. En el instante t_1 , el componente electrónico funcional pasa del estado activo ON al estado de espera LOW POWER. Este cambio de estado funcional constituye un evento. El próximo evento está previsto en el instante t_1 anterior al instante $t = 2 \cdot T_{sample}$. El simulador actualiza los parámetros del modelo en el instante t_1 .

40 Al estar el componente electrónico funcional en el estado de espera LOW POWER, la corriente instantánea entregada por la batería $i_{entregada}(t)$ es inferior a la corriente nominal. El simulador actualiza, por tanto, los parámetros del modelo en el instante correspondiente al próximo evento previsto en el instante t_2 .

45 En el instante t_2 , el componente electrónico funcional pasa del estado de espera LOW POWER al estado activo ON. Al estar en el estado activo ON el componente electrónico funcional, la corriente instantánea entregada por la batería $i_{entregada}(t)$ es superior a la corriente nominal. Por tanto, el simulador actualiza los parámetros del modelo en los instantes $t_2 + T_{sampling}$, $t_2 + 2 \cdot T_{sampling}$, $t_2 + 3 \cdot T_{sampling}$...

50 Las diferentes etapas del procedimiento se desarrollan por medio de un ordenador y se ejecutan a través de instrucciones de código de programa.

55 Consecuentemente, la invención va dirigida, también, a un producto de programa informático, siendo susceptible este programa de ser implementado en los medios de tratamiento o un sistema de informático, constandingo este programa de las instrucciones de código adaptadas para la realización de un procedimiento según la invención tal como se ha descrito anteriormente en la presente memoria.

60 Este programa puede utilizar cualquier lenguaje de programación, y puede estar en forma de código fuente, código objeto o código intermedio entre código fuente y código objeto, tal como en una forma parcialmente compilada, o en cualquier otra forma deseable.

La invención va dirigida, asimismo, a un soporte de información legible por un ordenador, y que comprende instrucciones de un programa informático tal como se ha mencionado anteriormente en la presente memoria. El soporte de información puede ser cualquier entidad o dispositivo capaz de almacenar el programa. Por ejemplo, el soporte puede comprender un medio de almacenamiento, tal como una ROM, por ejemplo una CD ROM o una

ROM de circuito microelectrónico, u otro medio de grabación. Por otro lado, el soporte de datos puede ser un soporte transmisible tal como una señal eléctrica u óptica, la cual se puede encaminar mediante un cable eléctrico u óptico, por radiocomunicaciones o a través de otros medios. Alternativamente, el soporte de datos puede ser un circuito integrado en el cual está incorporado el programa, estando adaptado el circuito para ejecutar o para ser utilizado en la ejecución del procedimiento en cuestión.

5

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de simulación del funcionamiento de un circuito electrónico implementado por ordenador, comprendiendo el circuito electrónico por lo menos una batería y por lo menos un componente electrónico funcional alimentado por la batería, modelizándose el circuito electrónico mediante un modelo numérico en el cual:
- la batería presenta dos estados de funcionamiento, que incluyen un estado de funcionamiento casi lineal según el cual una capacidad residual de la batería varía de manera casi lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería, y un estado de funcionamiento no lineal según el cual la capacidad residual de la batería varía de manera no lineal con la intensidad de la corriente instantánea entregada por la batería,
 - el componente electrónico funcional presenta varios estados de funcionamiento, correspondiéndose cada estado de funcionamiento con una corriente instantánea consumida por el componente electrónico,
- comprendiendo el procedimiento unas etapas (E5, E5') sucesivas que consisten en actualizar unos parámetros del modelo, incluyendo los parámetros una capacidad residual en curso de la batería $C_R(t)$, una corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ por la batería, un valor en curso de resistencia interna de la batería, y una tensión de alimentación en curso de la batería $V(t)$, ejecutándose las etapas de actualización:
- repetitivamente, a un intervalo de tiempo simulado predefinido, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal, y
 - en cada cambio de estado de funcionamiento de uno de los componentes electrónicos funcionales, cuando la batería está en estado de funcionamiento casi lineal.
2. Procedimiento de simulación según la reivindicación 1, ejecutándose las etapas de actualización de manera repetitiva, a un intervalo de tiempo constante, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal.
3. Procedimiento de simulación según la reivindicación 1, ejecutándose las etapas de actualización de manera repetitiva, a un intervalo de tiempo variable, siendo la duración del intervalo de tiempo inversamente proporcional al valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, cuando la batería está en estado de funcionamiento no lineal.
4. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, modelizándose el componente electrónico funcional con un modelo de componente electrónico funcional que presenta por lo menos como parámetro una corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$.
5. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, modelizándose la batería con un modelo de batería que presenta por lo menos como parámetro una tensión de alimentación $V(t)$, una corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$, y una capacidad residual $C_R(t)$.
6. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, presentando, además, el modelo de componente electrónico funcional y el modelo de batería, como parámetro, una temperatura del componente y una temperatura de la batería.
7. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas siguientes:
- (E4) comparar la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ por la batería con un valor umbral correspondiente a la corriente nominal de la batería;
 - si la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ es inferior a la corriente nominal de la batería, actualizar los parámetros del modelo, en el transcurso de las etapas de actualización de los parámetros del modelo (E5), en el instante correspondiente al próximo cambio de modo del componente electrónico funcional;
 - si la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ es superior a la corriente nominal de la batería, actualizar los parámetros del modelo, en el transcurso de las etapas de actualización de los parámetros del modelo (E5''), en el instante siguiente, separado de un instante en curso por el paso de tiempo.
8. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, consistiendo las etapas de actualización de los parámetros del modelo (E5, E5'') en actualizar los parámetros del modelo comprendiendo las siguientes subetapas:
- actualizar los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ de los diferentes componentes funcionales en función del valor precedente de la tensión de alimentación $V(t_{i-1})$ y del estado en curso del

componente funcional;

- actualizar el valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ en función de los valores de la corriente instantánea consumida $i_{consumida}(t)$ de los diferentes componentes funcionales;
- actualizar el valor de la capacidad residual $C_R(t)$ en función del valor precedente de la capacidad residual $C_R(t_{i-1})$, del valor de la corriente instantánea entregada $i_{entregada}(t)$ y del tiempo transcurrido Δt desde la última actualización;
- actualizar el valor de la resistencia interna $r(t)$ de la batería en función del valor actualizado de la capacidad residual de la batería $C_R(t)$;
- actualizar el valor de la tensión de alimentación $V(t)$ en función del valor actualizado de la capacidad residual de la batería $C_R(t)$ y del valor actualizado de la resistencia interna de la batería.

9. Procedimiento de simulación según la reivindicación anterior, calculándose el valor actualizado de la capacidad residual $C_R(t)$ según la ecuación:

$$C_R(t_i) = C_R(t_{i-1}) - (i_{eq}(t_i) \times \Delta t), \text{ siendo } i_{eq}(t) = \frac{C_{nominal}}{C_{ef}(i_{entregada}(t))} \times i_{entregada}(t),$$

siendo:

$\Delta t = t_i - t_{i-1}$, siendo t_i el instante de dicha actualización y t_{i-1} el instante de la actualización precedente;
 $C_{nominal}$ es la capacidad nominal de la batería;
 $C_{ef}(i(t))$ es la capacidad efectiva de la batería.

10. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el modelo una función de control del tiempo simulado, que define los estados de funcionamiento de los componentes electrónicos funcionales e instantes de cambio de estados de funcionamiento, desde el tiempo de inicio de la simulación hasta un tiempo final, comprendiendo, además, el procedimiento, una etapa (E6), después de cada etapa de actualización de los parámetros (E5, E5'), de actualización de la función de control del tiempo.

11. Procedimiento de simulación según una de las reivindicaciones anteriores, repitiéndose las etapas (E5, E5') de actualización de los parámetros del modelo hasta que la tensión en los terminales de la batería $V(t)$ sea inferior a un valor umbral predefinido que se corresponde con la tensión de corte de la batería, o hasta que la capacidad residual de la batería $C_R(t)$ sea inferior a un valor umbral predefinido.

12. Procedimiento de determinación de la autonomía energética de una batería en un circuito electrónico que comprende por lo menos una batería y un componente electrónico funcional alimentado por la batería, consistente en simular el funcionamiento del circuito electrónico, según un procedimiento conforme con la reivindicación 11, determinándose la autonomía energética de la batería como igual a la duración comprendida entre el instante correspondiente al inicio de la simulación y el instante correspondiente a la finalización de la simulación.

13. Producto de programa informático que comprende instrucciones de código de programa para la ejecución de las etapas del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

FIG. 1

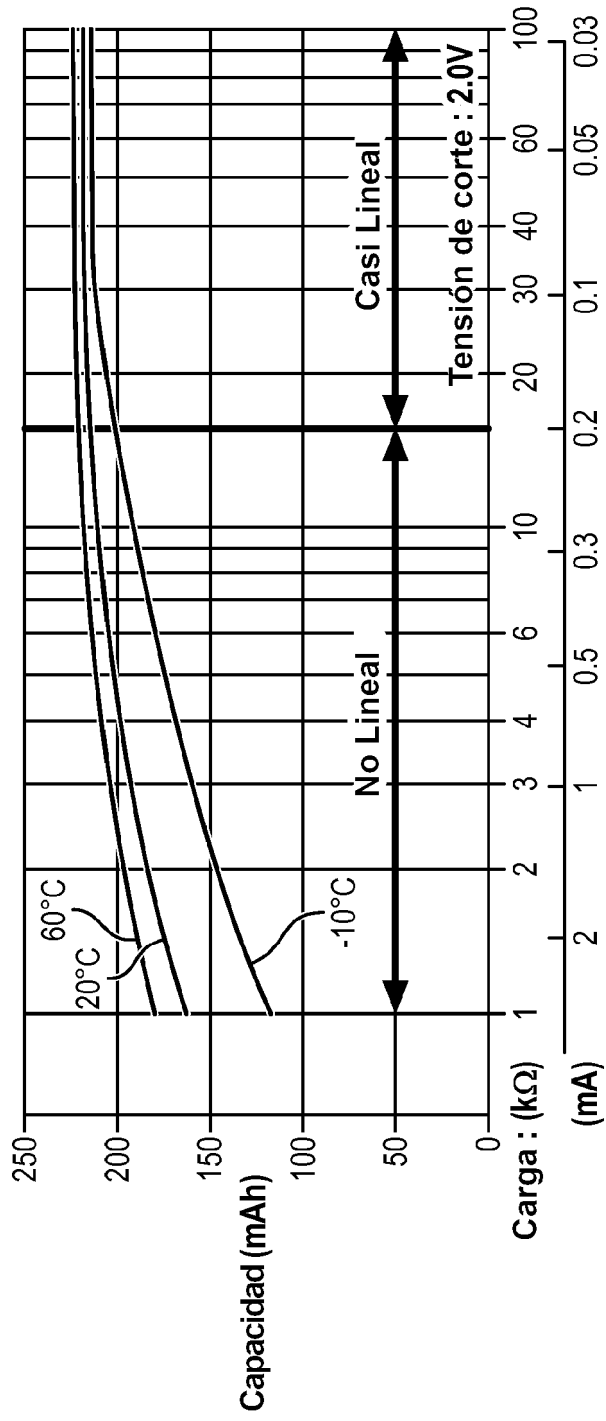


FIG. 2a

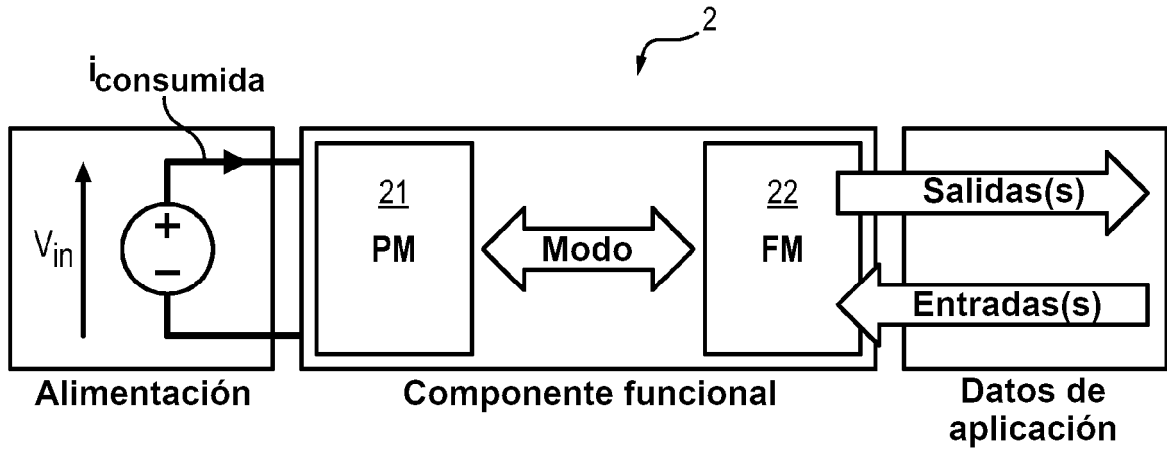


FIG. 2b

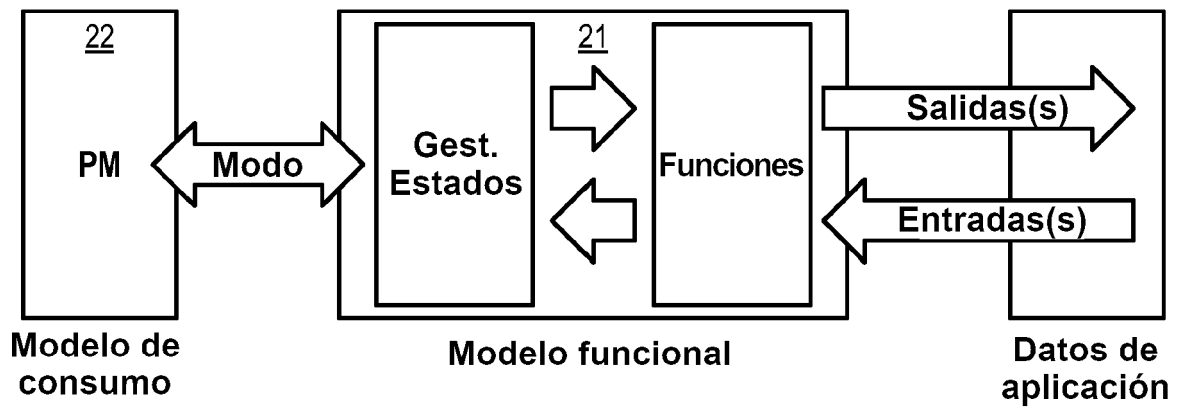


FIG. 2c

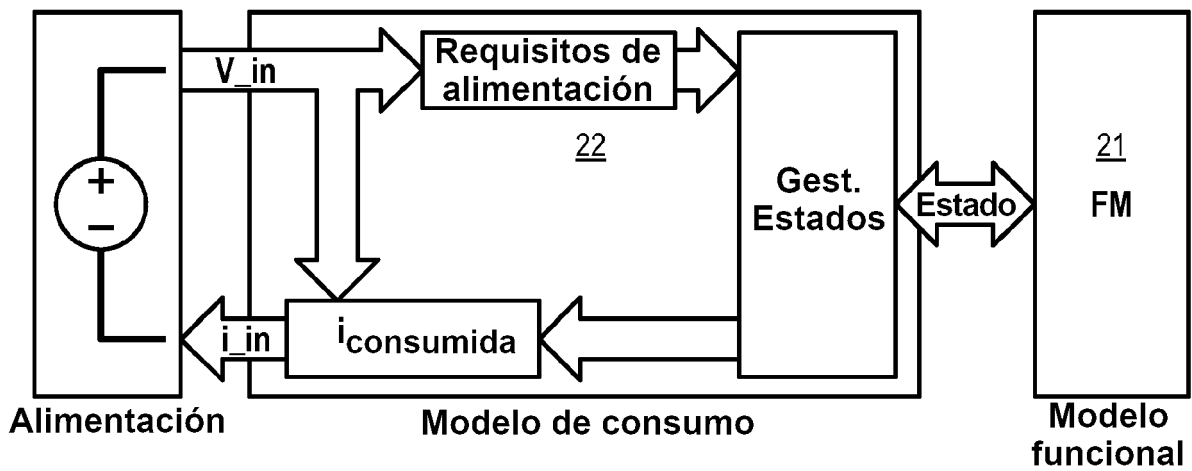


FIG. 3

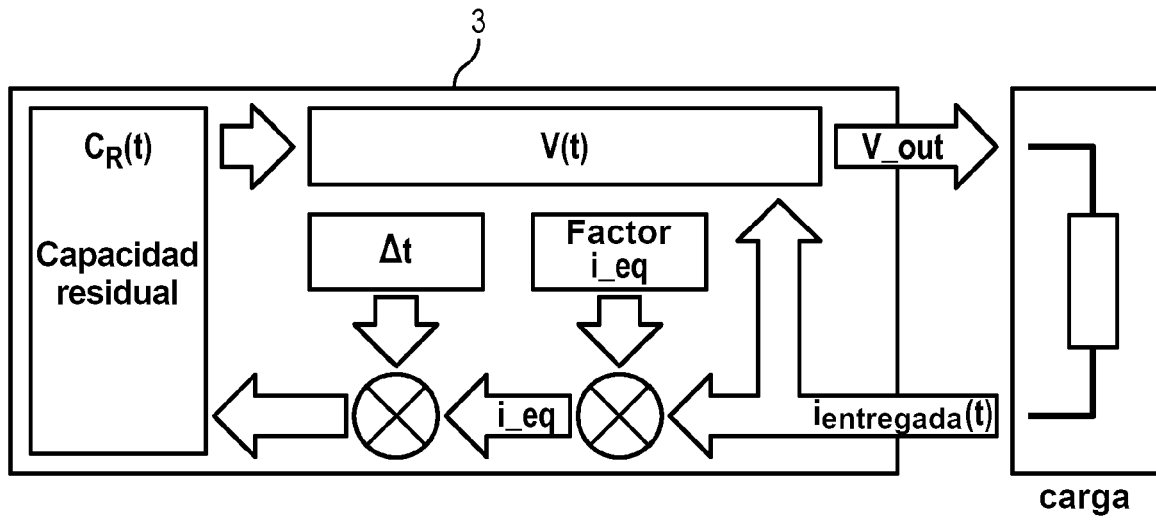


FIG. 4

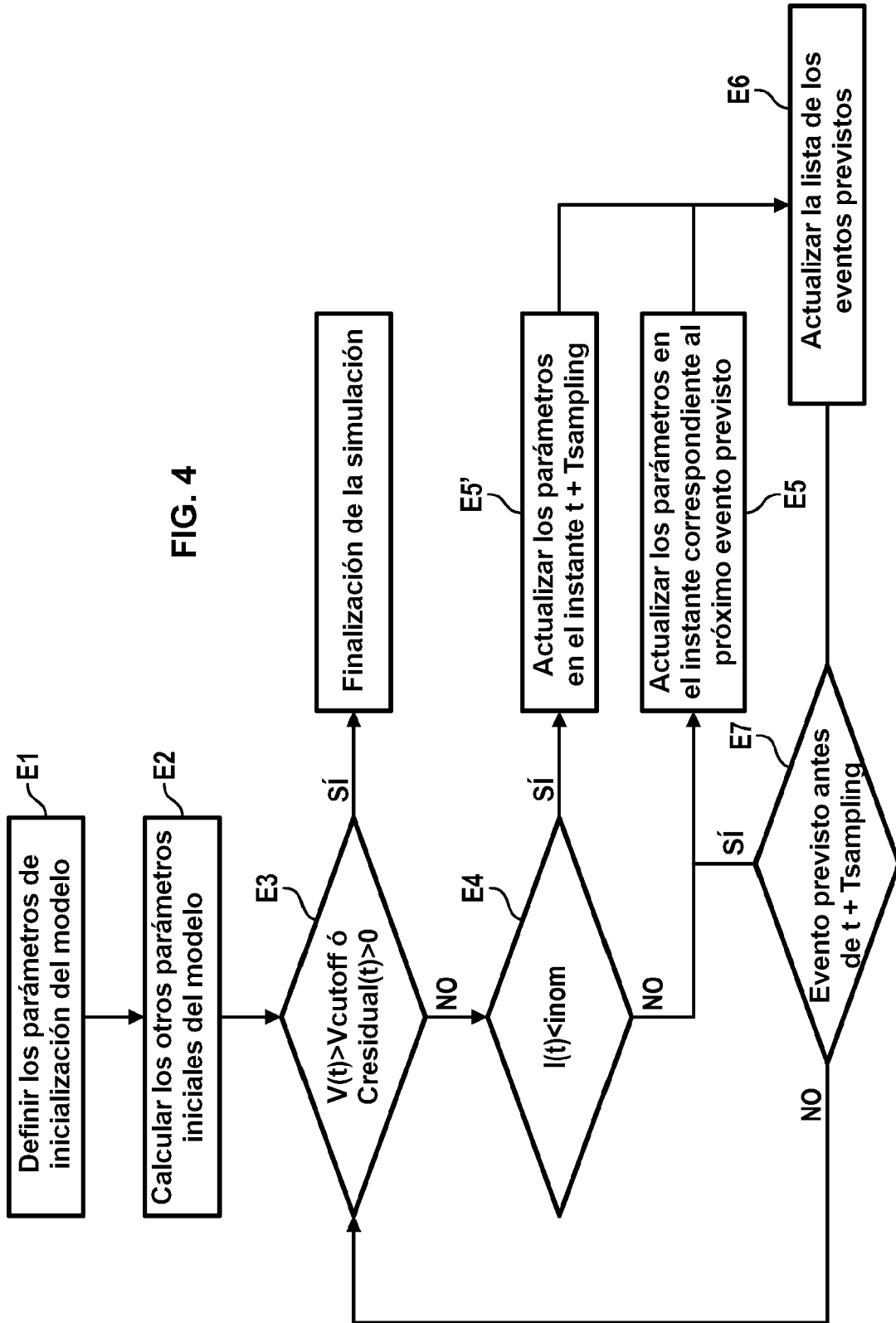


FIG. 5

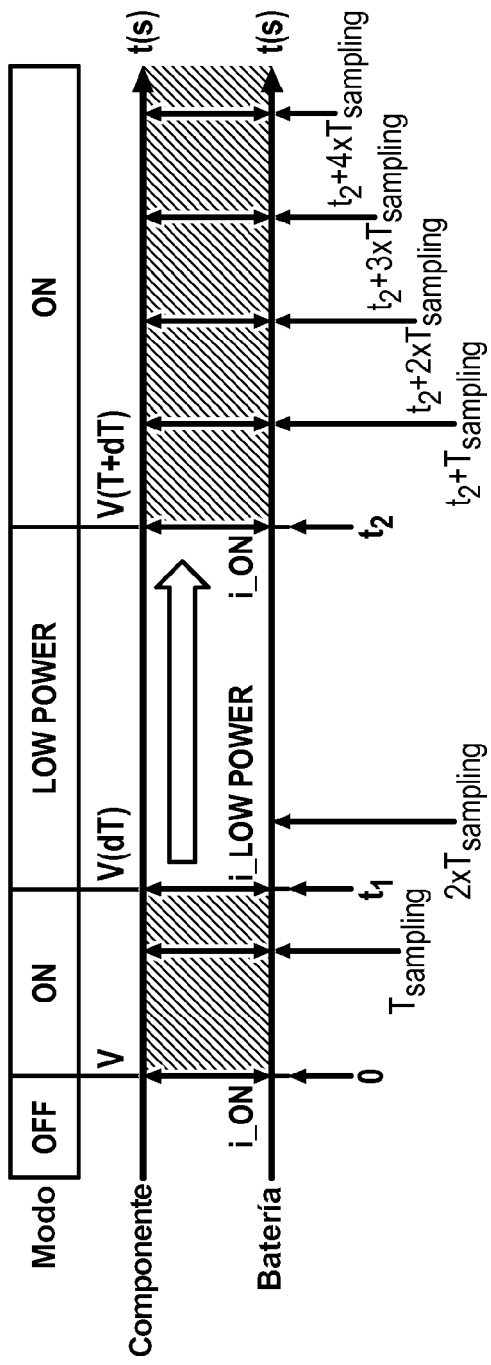


FIG. 6

