

Automedida de consumo en dispositivos portables

Julian Oreggioni, Leonardo Steinfeld
IIE, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
{juliano, leo}@fing.edu.uy

Resumen—Este trabajo presenta un método para que un microcontrolador pueda medir en tiempo real su propio consumo de energía, y el de todo el sistema del que forma parte. Para muchos dispositivos portables es de gran utilidad disponer de la medida de su consumo en tiempo real. En particular, los nodos que forman parte de redes de sensores inalámbricos podrían usar esa información para modificar su comportamiento, adaptando la frecuencia de muestreo de sus sensores, modificando los ciclos de trabajo de la radio o incorporando dicha información en los algoritmos de ruteo. Por otra parte, el módulo desarrollado permite ser utilizado para medir el consumo a otros dispositivos con el objetivo de ayudar al testeado y optimización de código (dentro o fuera del laboratorio) brindando un herramienta de medición portable y automatizada. El método de medida implementado, que se basa en la carga y descarga de capacitores, se probó en un sistema basado en el microcontrolador MSP430F2274 de Texas Instruments. Se realizaron pruebas exitosas en configuración de automedida y midiendo el consumo a otro dispositivo, logrando una validación primaria de su funcionamiento.

Palabras clave—Medida de consumo, Redes de Sensores Inalambricos, Bajo Consumo.

I. INTRODUCCIÓN

El disponer de la medida del consumo en tiempo real de cada uno de los nodos que forman parte de redes de sensores inalámbricos abre una serie de aplicaciones interesantes, especialmente para aquellos que están instalados en lugares inhóspitos o de difícil acceso. Por ejemplo, permite incorporar en la lógica de operación, decisiones que dependen del consumo efectivo de cada nodo: modificar la frecuencia de muestreo de sensores, ajustar el ciclo de trabajo de una radio (subcapa de acceso al medio) o afectar el ruteo de los paquetes. También es de utilidad para el testeado y la optimización de código para minimizar el consumo, ya sea dentro o fuera del laboratorio. Por último, ofrece un sistema de medición portable, remoto y automatizado para otros dispositivos.

Las soluciones existentes para medir el consumo de dispositivos portables pueden clasificarse en función de quien realiza la medida: ya sea el propio dispositivo (auto-medida) o un dispositivo externo. También pueden clasificarse según el principio básico de funcionamiento: medida de corriente utilizando un resistor serie o medida de la descarga de capacitores.

Dependiendo de las características de la fuente de alimentación del dispositivo portable (batería, super-

capacitor, panel solar, o sistema de alimentación híbrido) y de las necesidades de la aplicación en cuanto al uso de la información de consumo, puede interesar disponer la medida de consumo en términos de carga, corriente, potencia o energía. El método de medida determina la magnitud que directa o indirectamente se obtiene. Posteriormente, ya sea integrando (acumulando) o diferenciando (computando el cociente incremental a intervalos convenientes) y eventualmente usando el valor de la tensión de alimentación, es posible obtener las magnitudes derivadas si fueran de interés para la aplicación.

En el presente trabajo se busca encontrar una solución que permita brindarle a un microcontrolador un método para que pueda medir, en tiempo real, su propio consumo de energía y el de todo el sistema del que forma parte. La medida de consumo deber estar disponible durante su funcionamiento normal, es decir fuera de laboratorio y sin utilizar instrumentos externos. La solución debe garantizar que el consumo asociado de la medida no afecte en forma significativa la autonomía del dispositivo y no afecte su normal funcionamiento. La solución debe funcionar sobre un rango dinámico amplio, permitiendo medir consumos derivados de corrientes de entre $10\mu A$ (nodo dormido) hasta $30mA$ (microcontrolador activo y radio en transmisión o recepción) y variaciones menores a $1ms$. Por último, es necesario que la solución sea fácilmente incorporable a sistemas existentes.

II. MÉTODO DE MEDIDA DE ENERGÍA

II-A. Revisión de métodos

El método de medida de la descarga de capacitores se basa en alimentar el dispositivo utilizando un capacitor (o un par alternados). Este método se ha utilizado en la herramienta denominada *Energy Bucket* [1] para apoyar la programación o el debugging de los nodos. La misma es concebida como un dispositivo externo conectado a un PC. La resolución de la medida depende de la carga entregada por los capacitores al descargarse desde un valor de tensión inicial hasta un valor final, ambos conocidos. La carga total consumida es suma de las cargas entregadas, valor calculado a partir de la cantidad de veces que se descarga cada capacitor y la unidad de carga respectiva.

En el caso de la medida de corriente se dispone un resistor serie (*shunt*) de valor conocido entre la alimentación y el dispositivo, donde la corriente consumida es proporcional a la caída de tensión sobre el resistor. Este principio es

el utilizado por circuitos integrados *contadores de coulomb* [2] [3], que miden la carga consumida en intervalos de tiempo regulares. En [4] se plantea un sistema externo para registrar el consumo de varios nodos de una red de sensores inalámbricos utilizando este método. La caída de tensión sobre el resistor a través del cual se alimenta cada nodo es amplificada, digitalizada y transmitida a un concentrador (Linksys NSLU2, cuyo sistema operativo es un Linux embebido modificado). Esta propuesta es adecuada para entornos de laboratorio, ya que involucra una red cableada para obtener los datos, no siendo posible su adopción para medida en campo. Otra limitación es la relativa baja resolución temporal en la adquisición, no logrando captar cambios de corta duración en la corriente, presentes en estos nodos. Este mismo método, pero utilizando un VCO y un contador, es usado en un dispositivo externo que mide la carga total consumida por un nodo [5]. Esta información es transmitida al nodo de manera que puede utilizarse en tiempo real. Sin embargo, el dispositivo de medida requiere una alimentación independiente para no afectar la autonomía del nodo. En conjunto esta propuesta aumenta de manera significativa el costo de cada nodo limitando su uso en redes de gran porte. Por otra parte, la misma técnica ha sido adoptada como parte de la gestión de la batería de un marcapaso implantable [6], el cual mide su propio consumo de carga.

Finalmente, en [7] se propone una solución alternativa que se basa en estimar el consumo a partir de medidas de tiempo. El trabajo propone caracterizar en el laboratorio el consumo de nodos de sensores inalámbricos. Identifican y miden diferentes niveles de consumo aproximadamente constantes correspondientes a diferentes estados del nodo (dormido, microcontrolador activo, radio en transmisión o recepción). Luego el propio nodo en campo mide los tiempos en cada estado y lleva un registro del tiempo acumulado en cada estado. Estos datos permiten estimar el consumo acumulado en cada estado y el total. El módulo de estimación de energía *EnergEst* está integrado al sistema operativo ContikiOS [8]. El problema que presenta esta solución es que presupone que la corriente en cada estado no varía en el tiempo. Sin embargo, la corriente consumida por el microcontrolador y la radio varía significativamente con la temperatura. En particular las corrientes de sleep, de gran peso relativo en estos sistemas de muy bajo ciclo de trabajo, llegan a variar hasta 100% [9] [10].

II-B. Método propuesto

Se propone utilizar el método de medida de consumo basado en la descarga de capacitores similar al planteado en [1] para medir el consumo de terceros, pero modificado para utilizarlo en forma de auto-medida. Además de contar los *quántums* de descarga de los capacitores, se le agrega la posibilidad de medir descargas parciales a intervalos arbitrarios mediante la utilización de un conversor AD.

La descarga de capacitores como método de medida plantea una ventaja importante respecto a los métodos

tradicionales: no es necesario estar continuamente midiendo la tensión que cae sobre una resistencia, para integrarlo después y obtener el valor de la carga consumida. Desde este punto de vista, la descarga de capacitores involucra menos recursos, menos consumo y permite monitorear un amplio rango dinámico incluyendo consumo muy pequeños.

El principio de funcionamiento radica en alimentar el sistema sobre el cual se desean realizar las medidas desde dos capacitores, en lugar de alimentarse directamente de una fuente de tensión. Durante un ciclo de trabajo, el sistema consume carga de un capacitor, mientras el otro capacitor se carga. En el ciclo siguiente de trabajo se intercambian los capacitores, pasando el primero a cargarse y el segundo a alimentar el sistema.

La diferencia de tensión en los capacitores se utiliza para calcular el consumo del circuito durante un ciclo de trabajo. En efecto, si la tensión en un capacitor de capacidad C vale V_0 en un instante t_0 y luego de un tiempo t_1 pasa a V_1 , la carga consumida $Q_1 - Q_0$ durante el intervalo $t_1 - t_0$ es: $Q_1 - Q_0 = C(V_1 - V_0)$.

Para implementar el intercambio de capacitores en forma automática se agregan llaves analógicas (ver figura 1). Éstas permiten manipular los capacitores de acuerdo a un algoritmo de control básico.

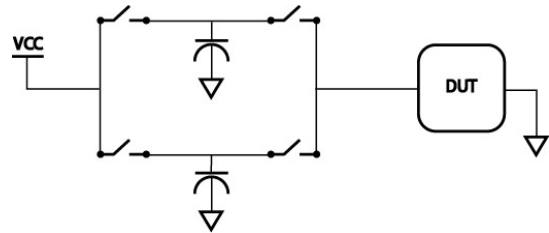


Figura 1. SEM - Llaves y capacitores.

La alimentación proporcionada por los capacitores está monitoreada todo el tiempo por un comparador contra una tensión de umbral V_{TH} (ver figura 2). Una vez que la tensión cae hasta ese valor umbral, se produce una interrupción y el módulo de software intercambia los capacitores e incrementa la cuenta de capacitores. Para conocer el consumo en un intervalo de tiempo dado, basta con tener el número de veces que se intercambiaron los capacitores.

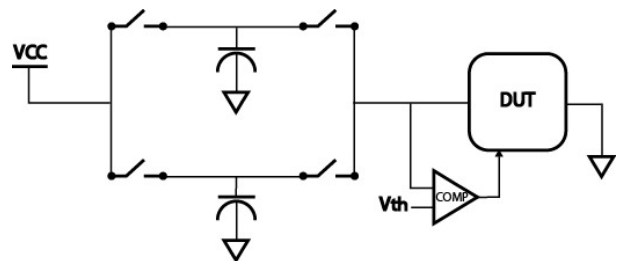


Figura 2. SEM - Llaves, capacitores y comparador.

Este método de medida (que hemos denominado *grueso*,

utilizado en [1]) cuenta descargas de capacitores completas, con lo cual el error de cuantización, dependiendo de los parámetros del sistema y de la aplicación en particular, puede llegar a ser alto. Para mejorar la precisión de la medida se propone un método (llamado *fino*), que consiste en agregar un conversor AD (ver figura 3) que permita medir la tensión de los capacitores en cualquier momento.

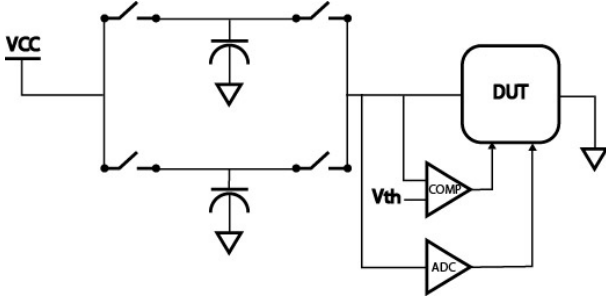


Figura 3. SEM - Llaves, capacitores, comparador y conversor AD.

El sistema presentado hasta aquí, denominado *Self Energy Metering* o *SEM*, puede ser levemente modificado y convertirse fácilmente en un dispositivo que mide el consumo a otro sistema. En la figura 4 se presenta un esquema de cómo sería este funcionamiento, que se llamará *External Energy Metering* o *EEM*. Los cambios son exclusivamente a nivel de hardware cambiando el conexionado de algunas señales, fácilmente adaptable en el software del microcontrolador con compilación condicional.

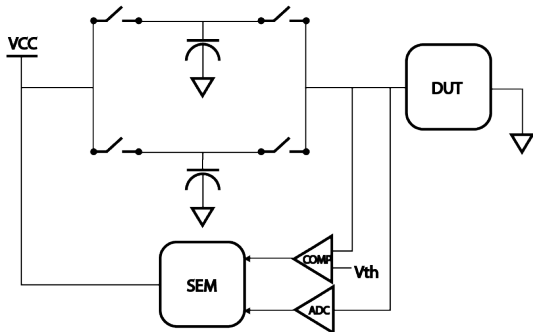


Figura 4. EEM - Llaves, capacitores, comparador y conversor AD

II-C. Parámetros del sistema

Al momento de diseñar se debe tener en cuenta cómo influyen algunos parámetros en la viabilidad de utilizar el sistema y en la resolución que se conseguirá. A continuación se analizará cómo influye la resolución del conversor AD, el tamaño de los capacitores, la resistencia del circuito de carga y la corriente máxima y mínima que drena el sistema a ser medido.

La *resolución* del método de medida está dada esencialmente por la resolución del conversor AD y el tamaño

de los capacitores. La variación de tensión en el capacitor está dada por $\Delta V = \Delta Q/C$ por lo que si el capacitor es muy grande y el sistema consume poca carga, *corriente mínima*, puede ocurrir que la variación de V sea menor a la resolución del conversor AD, con lo que no se podrá medir dicho consumo. Por lo que al momento de seleccionar los capacitores y determinar si la resolución del conversor AD es suficiente, se debe conocer el orden de los consumos a medir.

El *consumo máximo* determina algunos parámetros de diseño del sistema de medida. Si el tiempo de descarga de los capacitores es menor al tiempo de carga, luego de varios ciclos el sistema se quedará sin energía ya que los capacitores se estarán descargando más rápido de lo que pueden cargarse. Para que esto no suceda, la corriente promedio que se toma de los capacitores en cada ciclo debe ser menor a la corriente de cargado. Esta corriente está limitada fundamentalmente por la resistencia de las llaves, y en menor medida por la resistencia de la fuente, del capacitor y de las conexiones. Si se considera una resistencia de carga en el orden de $R_{ON} = 80\Omega$, que el capacitor comienza a cargarse con una $V_{TH} = 2V$ y que llegará hasta la tensión de la fuente (por ejemplo $V_{BAT} = 3V$), entonces la corriente promedio estará limitada a $((V_{BAT} + V_{TH})/2)/R_{ON} = 31,25mA$.

El valor de los capacitores debe ser cuidadosamente elegido. Por una parte, si se opta por capacitores de valor pequeño para poder tener mayor resolución, se corre el riesgo de que en casos de consumo elevado se deba conmutar los capacitores muchas veces por unidad de tiempo y que la velocidad de las llaves no sea suficiente; y en el caso particular del SEM, se aumente excesivamente la carga del procesador para calcular la medida, afectando la aplicación principal. Por otra parte, un mayor valor para los capacitores permitirá tener menos cambios por unidad de tiempo pero disminuyendo la resolución, ya sea gruesa (valores de cuántum de carga) o fina (dada por resolución del conversor AD). Finalmente, los capacitores utilizados son de tipo NP0 (Negative-Positive zero) para que la medida tenga dependencia mínima con variaciones en la temperatura.

La tensión de umbral V_{TH} en general podrá generarse internamente dentro del microcontrolador y su elección deberá ser compatible con la tensión mínima de funcionamiento del sistema. Para esto deberá considerarse que se requiere una precisión del orden del error de cuantización del conversor AD, que debe ser independiente de la variación de la temperatura y de bajo consumo.

II-D. Software de medida

El software del sistema de medida está a cargo del cambio de capacitores cuando se alcanza el umbral de descarga predefinido y lleva la cuenta de la energía consumida. Se estructura en un núcleo con funciones básicas y módulos que agregan funcionalidades extra (por ejemplo un “logger”) y se apoya sobre módulos driver que encapsulan los

detalles de la plataforma de hardware.

El software es capaz de llevar la cuenta del *consumo histórico o total* (el total desde el reset del sistema) y el *consumo parcial* (desde que se indica comenzar una medición). A través de la interfaz pública se pueden solicitar estos valores en todo momento.

El núcleo cuenta con lo indispensable para implementar las funcionalidades básicas:

- inicializar todo lo necesario para un correcto funcionamiento luego de un reset,
- calcular e incrementar la cuenta de la carga consumida cada vez que se cambia de capacitor,
- poner a cero la cuenta de carga total,
- indicar que se desea comenzar a contabilizar consumo a partir de cierto instante (consumo parcial),
- devolver el consumo histórico y el consumo parcial.

Cada vez que se cambia de capacitor se debe incrementar la cuenta de la carga Q en:

$$Q = Q_{anterior} + C_{actual} * (V_{C, inicial} - V_{C, actual}) \quad (1)$$

Donde :

- C_{actual} : es el valor del capacitor que se acaba de descargar.
- $V_{C, inicial}$: es la tensión del capacitor cuando comenzó a alimentar el circuito. Debe adquirirse al cambiar de capacitor porque no necesariamente puede estar cargado a la fuente y la fuente puede variar con el tiempo.
- $V_{C, actual}$: es la tensión del capacitor cuando se considera descargado, tensión de umbral, valor conocido.

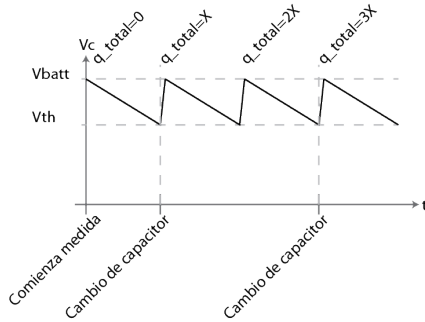


Figura 5. Actualización de consumo total

En la figura 5 se muestra como evoluciona a lo largo del tiempo, la variable q_total que lleva la cuenta del consumo histórico.

Cuando se realiza una medida parcial (ver figura 6), debe tomarse la tensión del capacitor al comenzar la medida y al terminarla.

Asimismo, deberá contemplarse que pueda haber un cambio de capacitores en medio de una medida parcial (ver figura 7).

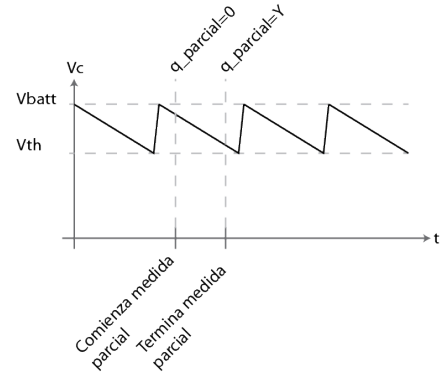


Figura 6. Cálculo de consumo parcial

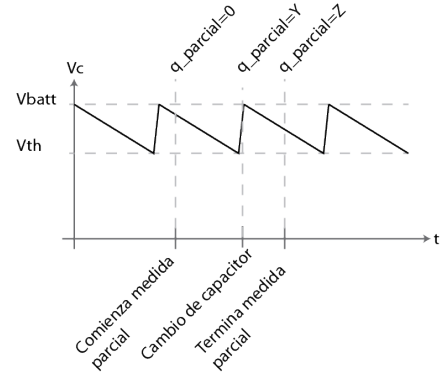


Figura 7. Actualización de consumo parcial

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se describen las diferentes configuraciones de prueba y la metodología utilizada para validar el sistema. Asimismo, se presentan y analizan los resultados obtenidos.

III-A. Pruebas básicas de validación

En primera instancia se comprobó cualitativamente que el sistema funcionaba correctamente: tanto las llaves, como el comparador y el convertor AD funcionaban de acuerdo a lo esperado, tanto separados como integrados.

En segundo lugar se validó el sistema utilizando el arreglo mostrado en la figura 8. Se configuró el sistema como EEM y se midió el consumo de una resistencia de valor conocido ($R = 15,5k\Omega$). Los capacitores se midieron con un LCR Meter modelo 875B del fabricante *B&K Precision* obteniendo que $C1 = 0,88mF$ y $C2 = 0,82mF$.

El valor arrojado por nuestro sistema se comparó con dos métodos para estimar el consumo. Primero, con un osciloscopio TDS220 del fabricante *Tektronix* se midió la caída de tensión ($\Delta V = 1,40V$) y con el valor medido de $C1$ y $C2$ se estimó un consumo esperado $Q_{esp,i} = \Delta V * C_i$. Este valor se contrasta, en la Tabla I, con el valor que arroja el sistema Q_{med} mostrando un correcto funcionamiento. Se aprecia una pequeña diferencia entre la estimación y la

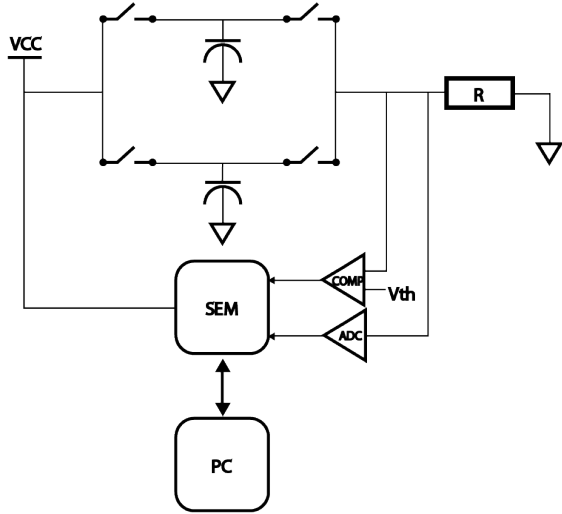


Figura 8. Arreglo para pruebas básicas de validación

medida que proviene del error de cuantización del convertidor A/D (y su eventual variación) al medir la tensión.

$Q_{esp}(mC)$	$Q_{med}(mC)$	$Dif.Relativa$
1,232	1,234	-0,2 %
2,380	2,362	0,8 %
3,612	3,594	0,5 %
4,760	4,715	0,9 %
5,992	5,950	0,7 %
7,140	7,100	0,6 %
8,372	8,335	0,4 %
9,520	9,482	0,4 %
10,752	10,700	0,5 %

Tabla I
PRUEBAS DE VALIDACIÓN BÁSICA

En segundo lugar, se observó en el osciloscopio la tensión $V(t)$ sobre R y se estimó el consumo según la ecuación 2.

$$Q = \int i(t)\Delta t = (1/R) \int V_i(t)\Delta t \quad (2)$$

En la Tabla II se compara el valor Q de la ecuación 2 obtenido a partir de la integral de la tensión dada por el osciloscopio (Q_{area}), con el promedio de los obtenidos por el sistema (Q_{med}^{prom}) que se listan en la Tabla I. La comparación muestra que los valores obtenidos son consistentes.

	$Q_{med}^{prom}(mC)$	$Q_{area}(mC)$	$Dif.Relativa$
C1	1,231	1,246	1,20 %
C2	1,137	1,172	3,08 %

Tabla II
PRUEBAS DE VALIDACIÓN BÁSICA

III-B. Pruebas del EEM

Para probar la capacidad de integración del módulo de medida de consumo EEM en un sistema existente, se eligió

el programa de demostración del kit de desarrollo del chip ez430-RF2500 de Texas Instruments. Éste consiste en dos nodos conectados por un enlace de radio: uno se denomina *Access Point o AP* y está conectado a un PC y el otro denominado *End Device o ED* es alimentado a pilas. Cada cierto intervalo de tiempo configurable (en nuestro caso cada un segundo) el AP mide la tensión de alimentación y temperatura y lo envía al PC donde se despliega en una consola. El ED hace lo mismo pero lo envía por radio al AP para que éste lo envíe al PC.

El firmware del AP está estructurado en funciones que inicializan el HW y la radio y luego un bucle que se ejecuta cada vez que el timer llega a cero (una vez por segundo). Dentro del bucle se realiza la medida de tensión de alimentación y de temperatura.

En primer lugar se integró el EEM en el AP midiendo el consumo de un dispositivo externo, utilizando el mismo esquema planteado en la figura 8 para medir el consumo de una resistencia y mostrarlo en la consola. En segundo lugar se integró el EEM en el ED. En este caso, se logró medir el consumo de la resistencia, enviarlo por radio al AP y mostrarlo en la consola.

III-C. Pruebas del SEM

Se integró el SEM en el ED con el objetivo de que se auto-mida el consumo y lo envíe al AP para mostrarlo en la consola.

Si inicialmente los capacitores están descargados, el microcontrolador no tendrá alimentación y no podrá comandar las llaves para cargar los capacitores. El arranque del circuito se resolvió cortocircuitando por unos instantes la fuente con el borne positivo de los capacitores hasta que el circuito arranca. Observar que una solución de encendido automática o de mayor complejidad que la propuesta no tiene sentido porque el sistema nunca se apaga en funcionamiento normal.

Además de la funciones básicas de gestión de medida, se integró un módulo de “logger” para que registre el consumo al cumplirse el segundo, luego un “for” para tener consumo del micro con la radio apagada y nuevamente otro registro de consumo. Cada uno de estos registros tiene un identificador diferente para mostrar en la consola del PC los dos estados: el consumo del sistema computando el “for” y el consumo del sistema mientras transmite.

Las pruebas preliminares mostraron un correcto funcionamiento del módulo en configuración SEM, obteniendo medida de consumo consistentes con las hojas de datos del kit.

IV. DISCUSIÓN

El overhead de consumo que aporta integrar el SEM es un aspecto crucial.

El microcontrolador utilizado en este proyecto no cuenta con un comparador con capacidad de interrumpir, esto se solucionó utilizando un amplificador operacional (como comparador) y realimentando su salida hacia un puerto

con capacidad de interrumpir. Para la tensión de umbral se utilizó una tensión de referencia interna al microcontrolador. Si bien este esquema soluciona el problema, hay una penalización desde el punto de vista del consumo que es significativa; en efecto, el V_{ref} consume $500\mu A$ y el operacional $200\mu A$, y estos consumos se registran todo el tiempo. La alternativa a este problema, pasa por utilizar microcontroladores que integren el comparador. Dentro de la propia familia MSP430, algunos dispositivos cuentan con el *Comparator_A+*. Si se mira la hoja de datos del microcontrolador del MSP430F20x1 se puede ver que su consumo típico es de $45\mu A$, valor que resulta mucho más razonable. Otra opción sería utilizar un comparador externo al microcontrolador, decisión que necesita evaluarse adecuadamente ponderando el incremento de componentes y costo.

El mayor aporte al overhead de consumo viene dado por los componentes que se tienen todo el tiempo prendido, en una primera aproximación se trataría del comparador ($45\mu A$), las llaves ($16\mu A$) y las resistencias de pull up (si son de $1M\Omega$ y trabajan de a pares, con un $V_{CC} = 3V$, el consumo promedio sería de $6\mu A$), lo cual totaliza $67\mu A$ que para muchas aplicaciones es un valor razonable. En todo caso, qué tan alto o bajo sea este consumo depende del consumo promedio del dispositivo al cual se le incorpora el módulo SEM. Por ejemplo, algunos nodos de redes de sensores inalámbricos operando a muy bajo ciclo de trabajo alcanzan consumos promedios tan bajos como $1 mA$, en cuyo caso el overhead de consumo podría considerarse aceptable.

V. CONCLUSIONES

Se presentó un primer prototipo de un módulo de medida de carga, configurable para ser utilizado como automecida (SEM) y capaz de medir el consumo un dispositivo externo (EEM).

La descarga de capacitores como método de medida plantea algunas ventajas importantes respecto a los métodos tradicionales: involucra menos recursos, menos consumo y permite monitorear un amplio rango dinámico incluyendo consumo muy pequeños. En contrapartida, implica aceptar un rizado de tensión sobre la carga y obliga a tener especial cuidado en su diseño ya que una falla en el sistema de medición puede dejar a la carga sin suministro de energía.

A futuro quedan planteados algunos puntos a resolver o mejorar. En primer lugar y relacionado con la última observación, se podría evaluar, como mecanismo a prueba de fallos, el uso de un supervisor de tensión de alimentación (SVS, *Supply Voltage Supervisor*), funcionalidad provista en gran parte de los microcontroladores actuales o implementado con componentes discretos. Si la tensión cae por debajo de cierto valor de seguridad, se dispara una rutina (a través de una interrupción) que conecta la alimentación directamente al sistema, accionando las

llaves correspondientes. En segundo lugar, sería interesante comparar los resultados que arroja este método con los obtenidos mediante la caracterización de módulos de software (por ejemplo Contiki en [7]), así como intercomparar los dos anteriores con el método propuesto en [6] en base a un VCO. Por otro lado, para este primer prototipo los valores de los capacitores se midieron en forma externa con instrumental especial y son constantes del código, un aspecto a mejorar sería proveer un método para medirlos automáticamente. Finalmente, es necesario seguir estudiando (y bajando) el overhead de consumo y la modificación de la carga del procesador al incorporar las rutinas de gestión del módulo de medida de consumo.

REFERENCIAS

- [1] J. Andersen and M. Hansen, "Energy bucket: A tool for power profiling and debugging of sensor nodes," in *Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2009.
- [2] Maxim, *DS2740 High-Precision Coulomb Counter Reference Design*.
- [3] Linear Technology, *LTC4150 Coulomb Counter, Battery Gas Gauge*.
- [4] I. Haratcherev, G. Halkes, T. Parker, O. Visser, and K. Langendoen, "Powerbench: A scalable testbed infrastructure for benchmarking power consumption," in *International Workshop on Sensor Network Engineering (IWSNE)*, 2008.
- [5] X. Jiang, P. Dutta, D. Culler, and I. Stoica, "Micro power meter for energy monitoring of wireless sensor networks at scale," in *6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 186–195, April 2007.
- [6] L. S. Y. Wong, S. Hossain, A. Ta, J. Edvinsson, D. H. Rivas, and H. Nääs, "A very low-power cmos mixed-signal ic for implantable pacemaker applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 39, pp. 2446–2456, December 2004.
- [7] A. Dunkels, F. Osterlind, N. Tsiftes, and Z. He, "Software-based on-line energy estimation for sensor nodes," in *4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, 2007.
- [8] "Contiki the open source os for the internet of things," disponible on-line: <http://www.contiki-os.org/>, 15 de noviembre de 2012.
- [9] Texas Instruments, *MSP430F543xA, MSP430F541xA Mixed Signal Microcontroller*, 2010.
- [10] Texas Instruments, *CC2520 Datasheet 2.4 GHz IEEE 802.15.4 ZIGBEE RF Transceiver*, 2007.