

# Modelo de Gestión de Demanda Energética Usando Tecnologías Inalámbricas

## Model of Energy Demand Management Using Wireless Technologies

Fabio León Suárez Álvarez, Edilson Delgado-Trejos

Laboratorio MIRP, Centro de Investigación, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín, Colombia

leonsuarez@hotmail.com, edilsondt@gmail.com

**Resumen**— El creciente uso de sistemas energizados exige la creación de modelos que permitan gestionar la demanda de energía eléctrica, involucrando tecnologías emergentes. A fin de implementar un sistema de gestión de demanda acorde con las necesidades de las redes inteligentes actuales, este artículo presenta un sistema basado en tecnología inalámbrica ZigBee para el monitoreo y control en tiempo real del consumo de corriente y factor de potencia de un motor AC, desde un host remoto mediante una red con direccionamiento IP. A diferencia de los modelos tradicionales, se propone una metodología y un modelo bidireccional de gestión de demanda energética.

**Palabras clave**— Consumo energético, demanda energética, eficiencia energética, electricidad, gestión de demanda, redes de sensores inalámbricos.

**Abstract**— The growing use of electronic systems requires the creation of models to manage the electricity demand, taking into account emerging technologies. In order to implement a demand management system according to the needs of current intelligent networks, a ZigBee wireless system is presented in this paper, which allows a real-time monitoring and control of current consumption and power factor of an AC motor, from a remote host through a network with IP addressing. Unlike traditional models, a methodology and a bidirectional model are proposed to manage energy demand.

**Key Words**— Energy consumption, power demand, energy efficiency, electricity, demand management, wireless sensor network.

### I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de controlar la creciente demanda energética ha llevado a los investigadores a crear diferentes modelos energéticos [1], [2]. Por tal motivo, existen modelos tanto para la demanda como para el suministro de energía. También existen modelos que han sido documentados para atender simultáneamente ambos aspectos del suministro y la demanda [3].

Los modelos actuales buscan integrar nuevas tecnologías y centran su atención del lado de la demanda [4], [5], sector

hasta ahora olvidado y poco considerado, reconociendo así el importante rol que juega el consumidor en el mercado energético. Estas nuevas tecnologías aportan cierto grado de inteligencia a la forma en que el usuario consume los recursos energéticos y permiten al mismo tiempo a las empresas de servicios públicos controlar la demanda de una forma más eficiente [6], [7]. Pero los modelos tradicionales presentan limitaciones que deben ser abordados para atender las necesidades actuales, ya que no son transportables, ni bidireccionales y solo se ajustan o adaptan a características específicas de cada país por la falta de estandarización [8].

Este artículo hace referencia a nuevas herramientas disponibles para gestionar la demanda de energía eléctrica, utilizando redes de telecomunicaciones, y se propone un modelo bidireccional de gestión de demanda energética, desde el lado del consumidor, sacando provecho de las características que ofrecen los sensores inalámbricos (e.g., tecnología ZigBee) para el monitoreo y control en tiempo real. Buscando que el modelo sea estándar y que el sistema implementado sea abierto, se parte de un modelo general, se propone un modelo bidireccional de demanda desde la eficiencia energética, se obtienen las relaciones funcionales de los elementos que componen el modelo y se crea un prototipo para validarlo.

### II. MODELO DE DEMANDA DE ENERGÍA

**1) Aspectos del modelado de la demanda de energía.** Las características específicas de los países en desarrollo tienen implicaciones para el modelado y análisis de la demanda de energía [9], [10]. Para el caso de Latinoamérica, estudios previos que han buscado formular modelos para análisis de demanda energética han revelado limitaciones debidas a serias restricciones en la adquisición de datos [8], [11]. A continuación, se presentan tres aspectos principales con los criterios respectivos que deben tenerse en cuenta a la hora de modelar un sistema de demanda (ver Tabla 1) y que deben considerarse en los países en desarrollo para garantizar un enfoque coherente y sistemático.

**2) Características de la demanda de energía.** Los modelos energéticos son un insumo importante para la planificación de la energía, puesto que ayudan al establecimiento continuo de políticas energéticas en el ámbito regional y nacional [3].

Comprensión teórica	Análisis de la demanda	Modelos específicos
¿Aplica la teoría a las energías tradicionales?	¿Su cobertura incluye zona urbana y rural?	¿Qué tipo de modelo usar?
¿Aplica e incluye la teoría al sector informal?	¿La cobertura económica incluye actividades informales?	¿Cuál es el objetivo principal del modelo?
¿Aplica la teoría a nuevas formas de demanda emergente?	¿Se incluyen aspectos económicos?	¿El modelo es específico de un país o es general?
	¿Se incluyen diferentes tecnologías?	¿El modelo es portable de un país a otro?
	¿Se encuentran disponibles los datos requeridos para el análisis?	¿Cuántos datos requiere el modelo?

Tabla 1. Aspectos para el modelado de la demanda en países en desarrollo [8].

Estos modelos capturan la demanda de energía requerida por el usuario final (electrodomésticos, máquinas y equipos en general), de forma que las variables relacionadas con el costo económico de la energía, las condiciones ambientales, y la calidad de vida son características embebidas en la demanda común de energía en la sociedad. En general, la literatura en esta área del conocimiento evidencia dos tendencias fuertes para el análisis energético: la econométrica y la ingeniería de uso final.

**3) La eficiencia energética: modelo general.** La experimentación ha demostrado que mediante regulaciones voluntarias sólo se logran resultados moderados. Los esquemas voluntarios se vuelven efectivos cuando están respaldados por regulaciones oficiales. Así, los mejores resultados se obtienen cuando se adopta una combinación de instrumentos voluntarios articulados con una mezcla de regulaciones. Luego, los estándares mínimos impuestos por las regulaciones deben usarse como un punto de partida para que los esquemas voluntarios puedan mejorar el rendimiento. La Figura 1 muestra la estructura piramidal del sistema de indicadores de eficiencia energética EEI (por sus siglas en inglés: *Energy Efficiency Indicator*) definido por la Agencia Internacional de Energía (IEA) [12]. Mientras en el nivel superior se utiliza usualmente un indicador que es la productividad, en el fondo de la pirámide junto a la eficiencia del proceso se encuentran indicadores que permiten determinar el consumo energético por unidad de producto fabricado. Dado que las actividades que ahorran energía se encuentran

normalmente a nivel de procesos (nivel inferior de la pirámide), se espera que los efectos se vean reflejados en los niveles superiores. Este sistema de indicadores EEI ha sido utilizado para evaluar eficiencia energética en los países desarrollados [13]. El desarrollo de modelos basados en EEI requiere que la utilización de energía en procesos industriales debe involucrar factores mediante componentes separables, para que los ahorros de energía puedan ser identificados y cualificados individualmente. Si los ahorros energéticos a nivel de procesos (en sectores y subsectores) pueden ser expandidos a nivel del sector sin distorsión alguna, entonces será posible explicar más fácilmente el EEI a nivel superior. Luego, un modelo estructural en términos de indicadores del nivel inferior es capaz de distinguir las diferencias energéticas entre las acciones de consumo y el usado por equipos o tecnologías, como las tecnologías inalámbricas, lo cual permite determinar aspectos cualitativos y cuantitativos del ahorro o la sobre-demanda energética del proceso.

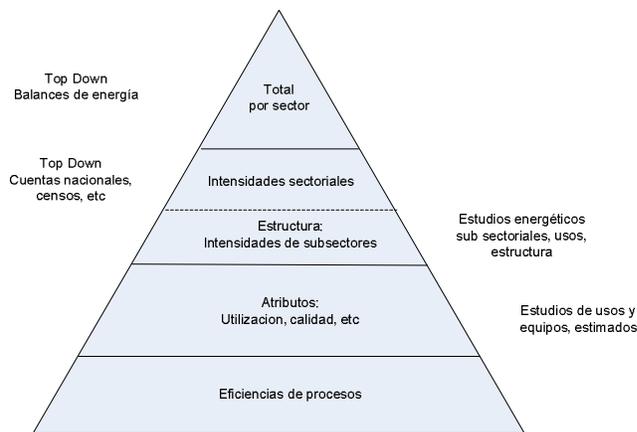


Figura 1. Sistema de indicadores de eficiencia energética [12].

**4) Modelo propuesto de demanda de energía desde la eficiencia energética.** La necesidad de hacer mejor uso de los recursos energéticos, ha llevado a muchos países a mejorar la eficiencia energética mediante el uso de nuevas tecnologías con miras al desarrollo sostenible. En este sentido, se presenta el auge de nuevas metodologías que identifican factores realmente influyentes en la demanda de energía y aunque la eficiencia energética es solo uno de los muchos aspectos que impactan el uso energético, se pueden identificar indicadores claves que permiten eliminar restricciones de demanda [10]. Dado que los modelos de energía se han formulado en términos de población, ingreso, factores de crecimiento y tecnología, los patrones de distribución de energía pueden estimarse desde un subsector de producción particular y avanzar gradualmente hasta los sectores más generales. Así, en aplicaciones industriales, se han desarrollado modelos solo para determinar la carga pico de un sistema, o predecir los requisitos para minimizar costos de operación [3]. Este artículo se enfoca en determinar un modelo de consumo de energía eléctrica considerando variables económicas o aspectos tecnológicos. El modelo que aquí se propone está basado en recomendaciones de la IEA [12]. Tal y como se puede observar en la Figura 2, el bloque A corresponde

de manera general a la estructura piramidal convencional mostrada en la Figura 1, pero se han adicionado nuevos elementos en el bloque B relacionados con el uso eficiente de energía en el sector industrial, dotando al nuevo modelo de alta capacidad de generalización, ya que su aplicación se sugiere desde diferentes grados de localidad, a partir de resultados específicos a escala micro, o desde una escala superior a partir de resultados de impacto. Este modelo propuesto involucra balances de energía de ámbito nacional, tomando en cuenta lo que la literatura ha sugerido en cuanto a que la tendencia general de todo un sector a nivel nacional podría ser el reflejo de políticas implementadas a nivel micro de algunos de sus subsectores (tendencia Bottom-UP). Por otro lado, algunos modelos, sugieren lo contrario, indicando que a partir de una política gubernamental podrían generarse efectos sobre algunos sectores, promoviendo así el crecimiento de subsectores específicos (tendencia Top-Down). El modelo de la Figura 2 integra las dos tendencias mediante la relación bidireccional entre el modelo de la IEA (bloque A) y el bloque B, contrapuesto a las tendencias tradicionales que imponen modelos ascendentes o descendentes por separado. Además, cada nivel del modelo genera sus propios indicadores (ver columna C de la Figura 2) para que el sistema de gestión pueda determinar su rendimiento.

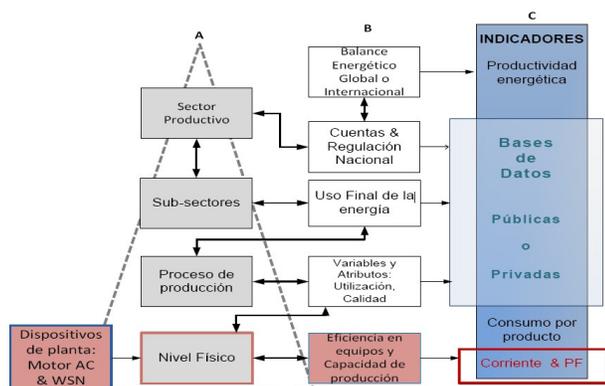


Figura 2. Modelo propuesto de gestión energética.

En el fondo del modelo se encuentran los elementos tecnológicos que afectan directamente la eficiencia del proceso, ya que permiten obtener datos específicos (de forma inalámbrica o cableada) acerca del consumo energético por cada unidad producida de los diferentes dispositivos instalados (i.e., motores, máquinas, etc.), los cuales son los que dan forma al producto final. De forma particular, este artículo propone el uso de la tecnología ZigBee para facilitar y asegurar calidad en la captura de información y direccionamiento IP en la transmisión de datos. El bloque B de la Figura 2 considera también los equipos, los métodos de operación y manejo de materias primas que pueden afectar el proceso de producción. Aquí es muy importante la forma en que opera la planta y la capacidad de producción que ésta posee, ya que cuando la planta funciona cerca de su capacidad máxima de

utilización, los ahorros energéticos alcanzarán sus valores máximos y esto reflejará una disminución del costo al revisar el indicador de consumo por producto. Como ya lo han demostrado estudios previos en Latinoamérica [14], se exige el uso de nuevas tecnologías que registren continuamente y con alta precisión las variables que intervienen en el sector industrial. Una vez más, el consumo y el ahorro energético dependen fuertemente de las mediciones. El continuo registro de datos históricos del proceso alimentará la información contenida en bases de datos que servirán para generar indicadores del consumo energético y así determinar los niveles de eficiencia. Como se evidencia en el bloque C de la Figura 2, las mediciones en el nivel inferior permiten precisar especificaciones propias del proceso y los datos recopilados visualizan la productividad del subsector, y a una escala mayor, de todo el sector al que pertenece, permitiendo pronosticar con gran precisión, la cantidad de energía requerida por el sector a nivel local, como también, los ahorros alcanzados a nivel nacional.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El prototipo utilizado para validar el modelo propuesto en la sección anterior básicamente está compuesto de un sistema de control de factor de potencia para motores eléctricos dotado de un sistema de adquisición de datos y comandado por un microcontrolador (ver Figura 3).

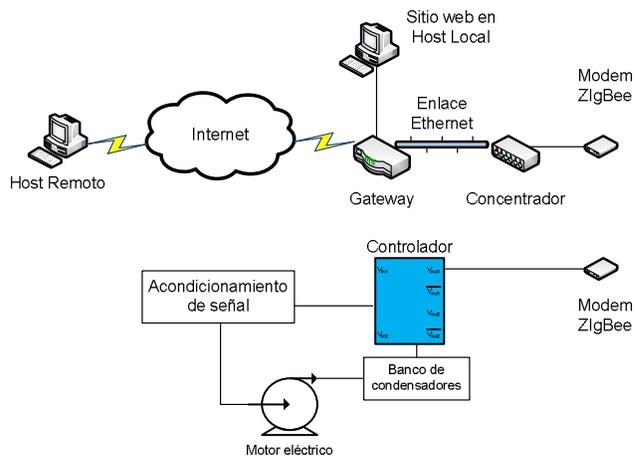


Figura 3. Sistema de control de Factor de Potencia.

Este sistema realiza el tratamiento de la señal de corriente, la cual es medida sobre una carga inductiva (motor) para calcular el desfase entre la señal de voltaje y corriente. Estos cálculos son realizados por un microcontrolador, quien a su vez transmite los resultados de factor de potencia e intensidad de corriente a través de un puerto serial en formato ASCII. Los datos que genera el micro-controlador ingresan a un módem ZigBee que se encarga de difundirlos sobre una red de sensores inalámbricos. Tal señal es capturada por un concentrador o Gateway y luego es distribuida por una red Ethernet hasta un PC en la red, el cual despliega y publica la información en un sitio Web con una dirección IP a fin de ser accedido desde cualquier lugar.

**1) Redes de sensores inalámbricos.** Las redes de sensores inalámbricos son una tecnología emergente de bajo costo, que se presta para monitoreo de un gran número de aplicaciones y ambientes [15]. El rápido progreso en las investigaciones vuelca su atención recientemente sobre el estudio y manejo eficiente de energía, en la gestión de datos y generación de estándares que cumplan con la demanda generada por nuevas aplicaciones que requieren gran confiabilidad y seguridad [16]. Así, el sistema eléctrico se ha beneficiado del avance en redes de sensores para control y monitoreo en aplicaciones de generación, distribución y consumo, puesto que las tendencias actuales en la gestión y eficiencia energética representan un ambiente favorable para aplicar conceptos de redes de acceso remoto con alta confiabilidad y seguridad [17]. Características de este tipo se encuentran disponibles en el estándar IEEE 802.15.4 y se espera que en un futuro cercano se encuentren inmersas en los sistemas de gestión inteligente *Smart Energy*, donde ZigBee ya ha propuesto su perfil de energía [15]. En general, los sensores inalámbricos se caracterizan por su pequeño tamaño, su facilidad para registrar fenómenos ambientales por medio de un conjunto de transductores y un radio con suministro de potencia autónomo que les permite transmitir información en diferentes bandas del espectro (315/433/868/916 MHz) y diferentes velocidades desde los 20 a 250 Kbps cuando operan en la banda de 2.4 GHz. Los rangos de cobertura varían desde 125 a 1000 m. Adicionalmente cuentan con un sistema operativo para la interacción con el hardware. El estándar IEEE 802.15.14 define las características físicas para acceder al medio de transmisión en una red inalámbrica de área personal de baja velocidad (LR-WPAN). La capa física usa espectro esparcido con secuencia directa (DSSS) en 16 canales de la banda de 2,45 GHz y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con offset (O-QPSK). En la transmisión, cada nodo construye una tabla creada por un protocolo de enrutamiento de vector-distancia por demanda, que permite establecer el costo de todos los enlaces basado en la calidad de cada uno de ellos.

**2) Arquitectura del sistema de gestión de demanda.** Disponer de los datos de corriente y factor de potencia en un sitio web da la posibilidad de realizar control desde cualquier lugar. Así, la implementación cuenta con un banco de condensadores que permiten mejorar el factor de potencia al alterar la carga reactiva y puede ser controlado desde un host remoto utilizando internet, tal y como se muestra en la Figura 4. A partir de esta arquitectura funcional se determinan las relaciones entre los diferentes elementos, de la cual se deriva la arquitectura física que supone el uso de una red inteligente para gestión de demanda energética utilizando redes inalámbricas, como se muestra en la Figura 5.

**3) Procedimiento propuesto.** Para la publicación de la información registrada acerca del consumo de un motor sobre una aplicación web en tiempo real, fue necesario contar con un servidor web embebido encargado de recibir

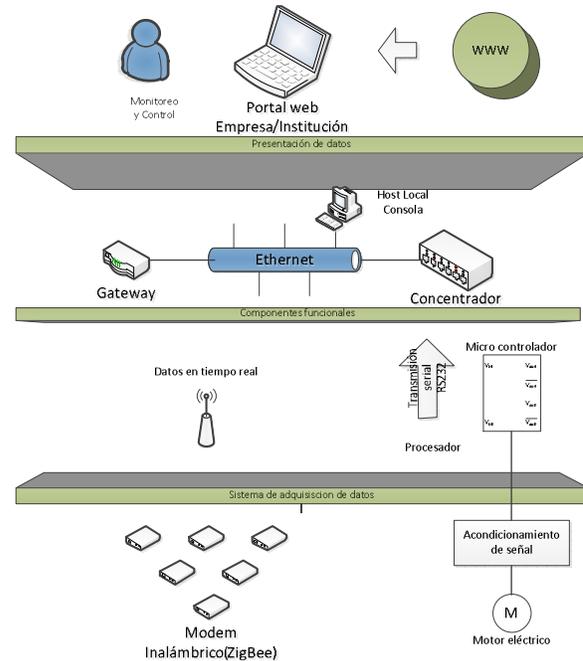


Figura 4. Arquitectura funcional del sistema.

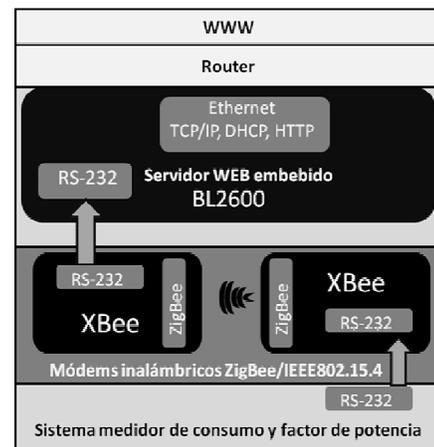


Figura 5. Arquitectura física del sistema.

la información de manera inalámbrica utilizando tecnología industrial ZigBee a 2.4 GHz desde el sistema medidor. El servidor web utilizado fue una BL2600, la cual es una SBC programable en lenguaje C con un procesador Rabbit 3000 operado a 44.2 MHz. Incorpora 512 KB de memoria flash, flash serial y 512 KB de RAM estática. Cuenta con entradas y salidas digitales de propósito general, entradas y salidas analógicas de corriente y voltaje, puertos seriales RS-232 /RS-485 y un puerto RJ-45 siguiendo el estándar IEEE 802.3, el cual soporta el protocolo de comunicación Ethernet a 10/100 Mbps. La BL fue programada con toda la pila de protocolos TCP/IP provisto por Rabbit, con servicios DHCP y HTTP, el cual sigue el esquema petición-respuesta de una red cliente-servidor. Se diseñó una página en HTML, como interfaz entre un usuario que se

encuentra en cualquier lugar y una red tipo PAN con tecnología ZigBee diseñada específicamente para capturar datos de consumo y factor de potencia registrados para el equipo (motor). Esta página fue importada dentro del código fuente de la BL mediante rutinas en C y gracias al protocolo HTTP, éste descarga los comandos al explorador web quien los traduce y organiza según el diseño de la página programada. La BL también fue equipada con un módem inalámbrico de Digi XBee, el cual sigue el estándar IEEE 802.15.4, con potencia de transmisión de 1 mW (0 dBm) y sensibilidad de recepción de hasta -92 dBm. Su rango de operación efectiva es de 30 m en ambiente interior. Este módem ZigBee usa toda la pila de EmberZNet 2.5 y el conjunto de características ZigBee PRO, además tiene un alcance superior a 3 Km con línea de vista. La comunicación con la BL2600 se logra a través de una interfaz UART utilizando el protocolo de comunicación serial RS-232.

**4) Simulación.** La simulación de algunos módulos del sistema real implementado se realizó usando el software Altium Designer®. Inicialmente, con el fin de aproximar un sistema convencional encontrado en la industria, se realizó la simulación de un motor AC con carga, tal y como se presenta en la Figura 6. La resistencia de 10 Ω, se utiliza para medir el voltaje y la corriente (en fase) hacia la carga, mientras que la resistencia de 142.5 Ω representa la resistencia del arrollamiento de la bobina (ambos valores medidos en el laboratorio). El circuito real incluye además, un arreglo de varios amplificadores operacionales para sincronizarse con la línea AC; y un módulo adicional del circuito acondiciona las señales de voltaje y corriente como entradas a un procesador digital de señales dsPIC30F3014, encargado de calcular el desfase entre ambas señales.

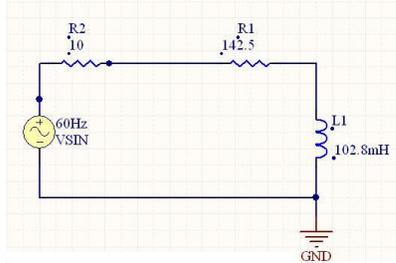


Figura 6. Circuito con carga inductiva.

En la Figura 7, se observan los resultados de simulación para el factor de potencia del circuito RL de la Figura 6. Con los valores máximos de corriente y voltaje y el tiempo de desfase, se obtiene:  $x = 180^\circ * 0.6839 / 8.333 = 14.77^\circ$ . Con lo cual el factor de potencia puede ser estimado como:  $\cos(14.77^\circ) = 0.967$ . Este resultado indica que es posible mejorar el factor de potencia con pequeñas variaciones en el sistema real. Usando amplificadores operacionales LM324AN, se construyen detectores de cruce por cero, tanto para la señal de voltaje como para la corriente (ver Figura 8). La fuente AC simula la señal alterna de voltaje o corriente. Los amplificadores se polarizan por medio de una fuente dual para poder hacer la comparación respecto

al sistema de referencia. El diodo se utiliza para tomar sólo el semiciclo positivo de las señales de corriente y voltaje. Luego, se usa otro comparador polarizado a 5 V DC, para llevar las señales al controlador dsPIC.

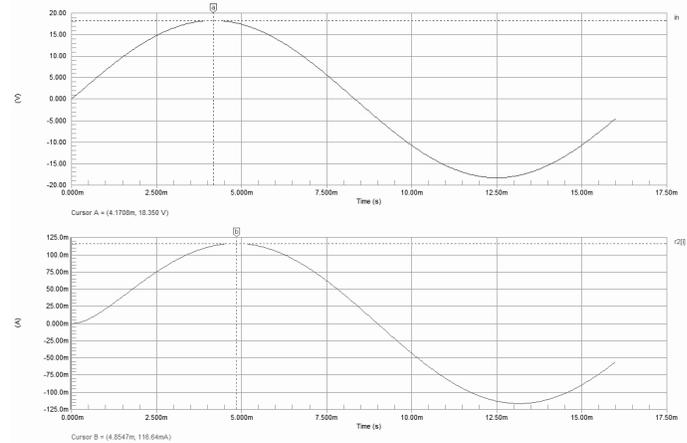


Figura 7. Simulación del factor de potencia del circuito RL.

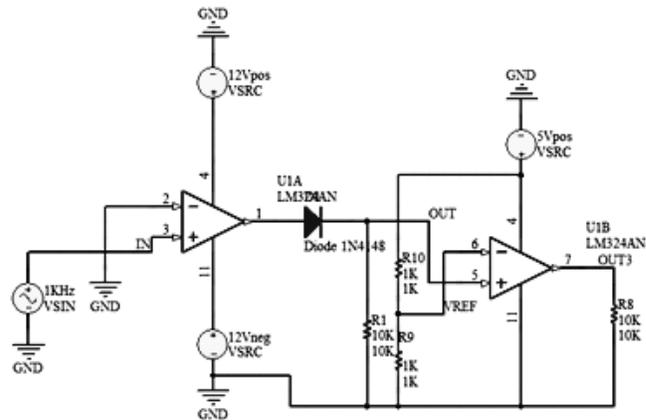


Figura 8. Circuito de detección de cruce por cero.

#### IV. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En este artículo, se propuso un modelo de demanda de energía desde la eficiencia energética con alto nivel de generalización, fácilmente transportable y de naturaleza bidireccional, el cual ofrece nuevas alternativas de análisis y supera en términos de estandarización a las tendencias tradicionales que imponen modelos ascendentes o descendentes por separado. Este modelo propuesto facilita el planteamiento relacionado con la sustitución de los métodos tradicionales de registro de información (forma cableada) por una red de sensores inalámbricos, utilizando el perfil de energía inteligente (Smart Energy) de la alianza ZigBee, en orden de superar los problemas de ruido e interferencia asociados a las tecnologías anteriores, además de aportar ahorros de energía consumida por el mismo sistema de medición. De acuerdo con esto, se pudo apreciar que para obtener mayores ventajas del sistema eléctrico, tanto las empresas de servicios públicos como los usuarios finales deben operar sus equipos con gran eficiencia. Un elemento clave para

mejorar el rendimiento del sistema eléctrico es mantener el factor de potencia cercano a la unidad, y esto exige de sistemas de monitoreo y control en tiempo real. Pero se deben involucrar tecnologías de nueva generación para garantizar la confiabilidad y seguridad del sistema.

Debido a que las industrias dependen en gran parte de la energía eléctrica, es indispensable controlar el consumo ineficiente que afecta directamente la rentabilidad y competitividad. De ahí que las facturas de servicios públicos se convierten en un indicador de la eficiencia en que son operadas las máquinas eléctricas. Aunque los motores consumen más energía que cualquier otro dispositivo eléctrico, y utilizan alrededor del 65% de la energía consumida en la industria, este artículo presenta nuevas oportunidades tecnológicas que permiten reducir los costos de energía, enfocándose en mejorar la eficiencia mediante mecanismos modernos de monitoreo y control. Así, los sistemas inalámbricos podrían promover un cambio hacia redes de servicios públicos más inteligentes. Aunque también deben considerarse múltiples aspectos relacionados con la calidad de los datos arrojados por el sistema energético, puesto que en esencia serán diferentes a los arrojados por los sistemas tradicionales. Adicionalmente, dado que la demanda debe considerar aspectos del lado del proveedor de energía y del lado del usuario consumidor, se hace necesario profundizar en los esquemas de consumo de energía desde el lado del consumidor y, por tanto, será necesario también, realizar una caracterización del consumo de energía en los sectores diferentes al industrial.

Finalmente, lograr que un modelo de gestión energética sea fácilmente transportable entre países, exige la inclusión de nuevos componentes en los niveles superiores del modelo. Pero éstos deben ser estandarizados, y por tanto, independientes de las condiciones gubernamentales específicas de cada país.

#### AGRADECIMIENTOS

Este artículo se presenta en el marco del proyecto de investigación PM10103 financiada por el Centro de Investigación del Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM de Medellín.

#### REFERENCIAS

- [1] L. Swan, V. Ugursal and I. Beausoleil-Morrison, "A New Hybrid End-Use Energy and Emissions Model of the Canadian Housing Stock," in *Proc. Int. Conf. on Building Energy and Environment*, Dalian, China, July 2008.
- [2] M. Aydinalp, V. Ugursal and A. Fung, "Modelling of Residential Energy Consumption at the National Level," *Int. J. Energ. Res.*, Vol. 27, No. 4, pp. 441-453, 2003.
- [3] S. Jebaraj and S. Iniyan, "A Review of Energy Models," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 10, No. 4, pp. 281-311, 2004
- [4] M. S. Majid, H. A. Rahman, M. Y. Hassan, and C. A. Ooi, "Demand Side Management Using Direct Load Control for Residential," in *Proc. 4th Stud. Conf. on Research and Development*, 2006, pp. 241-245.
- [5] E. Bonneville and A. Rialhe, "Demand Side Management for Residential and Commercial End-Users," *Eficiency and eco-design*, 11 pp., May 2006.
- [6] ROA Group Korea Consultants, "Introduction to Smart Grid: Latest Developments in the U.S., Europe and South Korea," *ROA Group White Paper*, 11 pp., July 2009.
- [7] D. Bohi, *Analyzing Demand Behaviour: A Study of Energy Elasticities*, Baltimore: John Hopkins University Press, 1981.
- [8] S. C. Bhattacharyya and G. R. Timilsina, "Energy Demand Models for Policy Formulation: A Comparative Study of Energy Demand Models," Policy Research Working Paper, Tech. Rep. WPS4866, March 2009.
- [9] V. S. Ailawadi and S. C. Bhattacharyya, "Access to Energy Services by the Poor in India: Current Situation and Need for Alternative Strategies," *Nat. Resour. Forum*, Vol. 30, pp. 2-14, 2006.
- [10] U. S. Congress, "Energy in Developing Countries," Office of Technology Assessment, Tech. Rep. OTA-E-486, Washington, DC, USA, January 1991.
- [11] IEA, "Energy and Poverty," Chapter 13, World Energy Outlook 2002, *International Energy Agency*, 2002, pp. 365-404.
- [12] L. Schipper, *Indicators of energy use and efficiency: Understanding the link between energy and human activity*, IEA, OECD Publisher, 1997.
- [13] L. M. Wu, B. S. Chen, Y. C. Bor and Y. C. Wu, "Structure Model of Energy Efficiency Indicators and Applications," *Energy Policy*, Vol. 35, No. 7, pp. 3768-77, 2007.
- [14] F. Urban, R. M. J. Benders and H. C. Moll, "Modelling Energy Systems for Developing Countries," *Energy Policy*, Vol. 35, No. 6, pp. 3473-82, 2007.
- [15] ZigBee Alliance, "ZigBee smart energy profile specification," *ZigBee Standards Organization*, Revision 15, Document 075356r15, 2008.
- [16] N. Ota, S. Ahrens, A. Redfern, P. Wright and X. Yang, "An Application-Driven Architecture for Residential Energy Management with Wireless Sensor Networks," in *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 639-644.
- [17] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta and Y. F. Hu, "Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards," *Computer Communication*, Vol. 30, No. 7, pp. 1655-95, 2007.