

# Topological and Technological Characterization of a Residential Energy Management System in the Smart Grid Context

M. Ortiz, W. Gómez, G. Archila, G. Ordoñez, J. Petit.

**Abstract**— This paper describes some strategies to reduce the electric energy consumption of residential users. Most of these strategies are related to the use of technologies that improve the level of efficiency of electrical systems and the use of non-conventional sources to partially or totally replace the energy dependency of the user on the network operator. A transversal aspect of this proposal is the adoption of cultural parameters that encourage the individual management of end-user demand as a success factor of a residential energy management strategy. At the end of the paper, it is proposed a technological scenario for typical users of residential energy systems.

**Resumen**— El presente artículo describe algunas estrategias para la reducción del consumo de energía eléctrica en usuarios residenciales. La mayoría de estas estrategias están relacionadas con el uso de tecnologías que incrementen el nivel de eficiencia de los sistemas eléctricos y el uso de fuentes no convencionales que sustituyan parcial o totalmente la dependencia energética del usuario al operador de red. Un aspecto transversal de la propuesta, es la adopción de parámetros culturales que propicien la gestión individual de la demanda del usuario final como factor de éxito de la estrategia de gestión energética residencial. Al final del documento se propone un escenario tecnológico para usuarios típicos del sistema energético residencial.

**Palabras claves**— Redes inteligentes, medición inteligente, consumo inteligente, gestión energética.

**Index Terms**— Smart grids, smart metering, smart consumption, energy management.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 10 años, la demanda de energía eléctrica en Colombia ha registrado un crecimiento promedio de 2,7% anual, siendo el 2008 el año de menor crecimiento con el 1,5%.

M. Ortiz es profesor de cátedra de la Universidad Industrial de Santander, miembro del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: [majortiz@gmail.com](mailto:majortiz@gmail.com)

W. Gómez, G. Archila son Ingenieros Electricistas de la Universidad Industrial de Santander.

G. Ordoñez y J.F Petit son profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, pertenecientes al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), Bucaramanga, Colombia. Correos electrónicos: [gaby@uis.edu.co](mailto:gaby@uis.edu.co), [jfpetit@uis.edu.co](mailto:jfpetit@uis.edu.co).

Durante este período, la potencia máxima ha presentado un incremento del 15,4% y se mantiene el mes de diciembre como la condición de potencia máxima.

El consumo energético del sector residencial corresponde al 41,2% del consumo total de Sistema Interconectado Nacional (SIN) [1] y es el de mayor consumo de energía eléctrica en el país [2]. Las proyecciones estiman que este sector tenga un crecimiento medio anual del 2,2%, que aun cuando resulta inferior al crecimiento estimado del 5,6% y 4,0% de los sectores terciario e industrial mantiene su posición predominante.

En este sentido, la gestión energética en el sector residencial se convierte en una meta importante e inmediata donde la conciencia global y las estrategias frente al uso racional y eficiente de la energía eléctrica constituyen un desafío que involucra a toda la cadena energética. En este sector, el usuario típico adopta tradicionalmente un rol pasivo en la gestión energética y pocas estrategias exceden las acciones individuales de mínimo impacto.

## II. RACIONALIZACIÓN DEL USO ENERGÉTICO

Diversas estrategias pueden propiciar el cumplimiento de una expectativa aceptable de metas de reducción del consumo energético, no obstante en el sector residencial la decisión de inversión es siempre sensible a la capacidad adquisitiva y a la jerarquía de necesidades siempre más importantes que el propósito que se persigue.

A continuación se describen algunas de las estrategias que permitirían la reducción del consumo energético en los usuarios residenciales.

### A. Electrodomésticos inteligentes

La oferta de artefactos de uso doméstico es bastante dinámica y la selección de productos debería considerar opciones adicionales como el etiquetado de los consumos y la eficiencia energética. Otro aspecto a considerar es la posibilidad de que los artefactos tengan capacidad de comunicación para controlar su funcionamiento mediante rutinas lógicas predefinidas o programadas en función de ciertos eventos del sistema doméstico o de la red de distribución. Lo cual supone importantes ventajas para aprovechar servicios complementarios del operador de red como las tarifas diferenciales y los servicios contextuales.

Adicionalmente la capacidad de diagnóstico y comunicación de los artefactos permitirá tiempos de respuesta oportunos del mantenimiento preventivo y correctivo, lo cual generalmente se asocia al incremento del consumo energético o la pérdida de confort por las anomalías técnicas de funcionamiento. La capacidad de efectuar diagnósticos de los artefactos en tiempo real, supone nuevas estrategias para mejorar la oferta de

productos derivados de la información capturada por los centros de investigación y desarrollo de los fabricantes de tecnologías. De otra parte las estrategias comerciales se individualizan mediante el uso de los servicios contextuales.

### B. Almacenamiento de energía renovable

El funcionamiento de las fuentes no convencionales como aerogeneradores y paneles fotovoltaicos dependen de condiciones meteorológicas difíciles de predecir, esto supone restricciones para atender perfiles de demanda específicos.

La dependencia de la velocidad de viento y la radiación solar supone condiciones críticas de operación. Las curvas de demanda fluctúan de manera independiente a la disponibilidad de las fuentes alternativas primarias, lo cual ocasiona lapsos donde la expectativa de generación no excede la demanda y se debe recurrir a las fuentes tradicionales. En otros casos la demanda puede ser inferior a la capacidad de generación, afectando la eficiencia del sistema y el retorno de las inversiones.

La respuesta a este problema son los sistemas de almacenamiento energético con capacidad de respuesta inmediata. La naturaleza de la energía eléctrica supone retos importantes para su almacenamiento y las alternativas disponibles no son de bajo costo e impacto ambiental, por ejemplo, un conjunto de baterías, inversor y rectificador implica costos importantes de inversión y mantenimiento, así como la necesidad de procesos adecuados del manejo y disposición final para los acumuladores, los paneles fotovoltaicos y los demás componentes cuando cumplen su ciclo de trabajo.

En la búsqueda de alternativas más eficientes y de menor costo e impacto ambiental se incluyen los compresores electrolíticos por aire comprimido. Aun cuando constituyen una etapa exploratoria para aplicaciones futuras se relaciona con tecnologías maduras sin barreras tecnológicas importantes.

Un compresor es una máquina para aumentar la presión y para desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido. El trabajo ejercido por el compresor es transferido al fluido. El aumento de la presión y la energía se convierten en energía de flujo con capacidad de impulso y de generar movimiento.

Al igual que las bombas, los compresores también desplazan fluidos, pero a diferencia de las primeras que son máquinas hidráulicas, éstos son máquinas térmicas, ya que su fluido de trabajo es compresible, sufre un cambio apreciable de densidad y, generalmente, también de temperatura; a diferencia de los ventiladores y los sopladores, los cuales impulsan fluidos compresibles, pero no aumentan su presión, densidad o temperatura de manera considerable [3].

Los compresores CAES (Almacenamiento de energía por aire comprimido) son una aplicación del aire comprimido con un generador acoplado al sistema que operan en ciclos alternados. Esta solución permite aprovechar los excedentes de generación de energía eléctrica durante las horas de bajo consumo y alta disponibilidad de fuentes de energía alternativa, la cual se almacena como fluido comprimido para revertir su proceso y obtener energía eléctrica durante las horas de alta

demanda y baja disponibilidad de fuentes alternativas. El uso de compresores CAES en ámbitos residenciales supone algunas restricciones de costos de inversión y mantenimiento, y de espacio y ruido ocasionado por el funcionamiento del compresor durante el proceso de compresión de aire.

### C. Los modelos computacionales

Las herramientas de simulación facilitan los tiempos de implantación de nuevos productos. Los sistemas eléctricos aprovechan estas ventajas para evaluar escenarios virtuales que permitan anticipar respuestas automáticas ante diversas situaciones predecibles o contingencias. La barrera tecnología se reduce cada día en cuanto a la capacidad de cómputo y a los tiempos de procesamiento de la información de los sistemas eléctricos en los grandes centros de población.

### D. Fuentes de respaldo energético

Los vehículos eléctricos suponen una expectativa de penetración bastante importante y dada la naturaleza de su funcionamiento se pueden incorporar fácilmente a los ámbitos domésticos como una fuente alternativa de energía o de respaldo energético en caso de contingencia o anomalía de funcionamiento del sistema de abastecimiento normal. Adicionalmente en un escenario de tarifa diferencial se pueden aprovechar las horas de menor tarifa para realizar el proceso de carga lenta de las baterías.

### E. Incremento de la generación energética

La capacidad de recibir y de transmitir información entre el operador de red y los clientes facilita la respuesta de los diferentes agentes y optimiza el uso de los recursos energéticos disponibles, lo cual aprovecha mejor la capacidad de generación. Adicionalmente mejorar la calidad de la energía, y la optimización del uso de las fuentes energéticas disponibles implica otros beneficios cuando se aprovecha toda la capacidad del sistema durante más tiempo, sin embargo el incremento de la demanda es un factor inevitable que implica la construcción de nuevas plantas de generación de energía eléctrica.

La expectativa energética en Colombia indica que hasta el 2018 no se requiere el crecimiento de la capacidad instalada de generación. En el largo plazo se prevé la expansión de al menos 1 900 megavatios adicionales, de los cuales 600 se consideran a partir de proyectos térmicos antes del 2021 y se tiene una expectativa adicional de 2050 mega watts si se remplazan las plantas en estado de obsolescencia tecnológica [4].

### F. Operación inteligente de la red

La modernización de los servicios públicos es una cuestión prioritaria para lograr una sociedad avanzada donde se garantice la calidad de vida de los ciudadanos por medio de estrategias que involucren mejoras en la cobertura, los modelos tarifarios, la calidad de servicio ofrecido y los sistemas de información, lo cual supone la simplicidad de los procesos, reducir de los tiempos de respuesta, la mitigación de los riesgos y el tratamiento atento y oportuno [5].

En términos generales, la creación y mejoramiento de tecnologías de monitorización, control y gestión energética en los hogares; sumadas a la creación de conciencia energética en sus usuarios tienen el potencial para lograr un decremento del 50% del consumo energético en el año 2050 [6].

Una red inteligente doméstica incorpora a las edificaciones dispositivos con capacidad de comunicar y operar de manera conjunta y autónoma las cargas de uso final garantizando las condiciones de confort, de seguridad y asistencia médica entre otros. En este sentido, los sistemas adquieren la capacidad de monitorización cercana a tiempo real, con retroalimentación de información y capacidad de gestionar el consumo energético de manera local y remota mediante la definición de marcos de referencia que puedan aprender y reconocer el comportamiento habitual de los usuarios [7].

La Figura 1 presenta la arquitectura global de sistema de redes inteligentes desde la red de distribución hasta el usuario final.

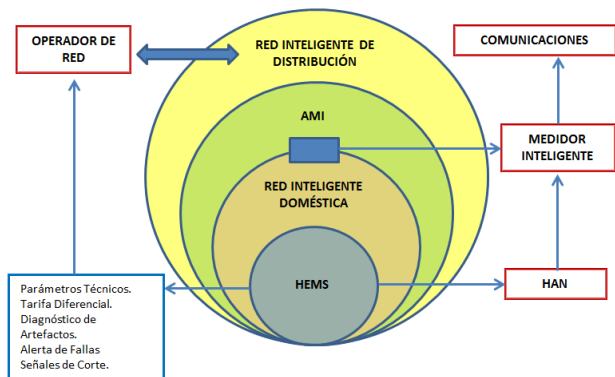


Figura 1 - Sistema de gestión energética residencial en el entorno de las redes inteligentes [8]

Diversos estudios han mostrado que solo con brindar a los usuarios el consumo desagregado de la energía y proveer retroalimentación frente a su consumo energético, la expectativa de reducción del consumo energético puede ser hasta del 18% [9], [10], y a su vez aumenta el nivel de conciencia de los usuarios propiciando nuevos patrones de comportamiento en la perspectiva del ahorro energético [11].

### III. GESTIÓN ENERGÉTICA RESIDENCIAL

Los sistemas de gestión energética residencial (HEMS por sus siglas en inglés) comprenden la arquitectura física, lógica y de comunicaciones que convergen en una unidad residencial. Un HEMS básicamente está compuesto por actuadores y aplicaciones. Los actuadores son los dispositivos, sistemas o programas que obtienen y suministran información para ejecutar instrucciones a voluntad del usuario o de acuerdo a una lógica programada previamente.

La Figura 2 indica la manera como un HEMS se puede describir en un ciclo cerrado.

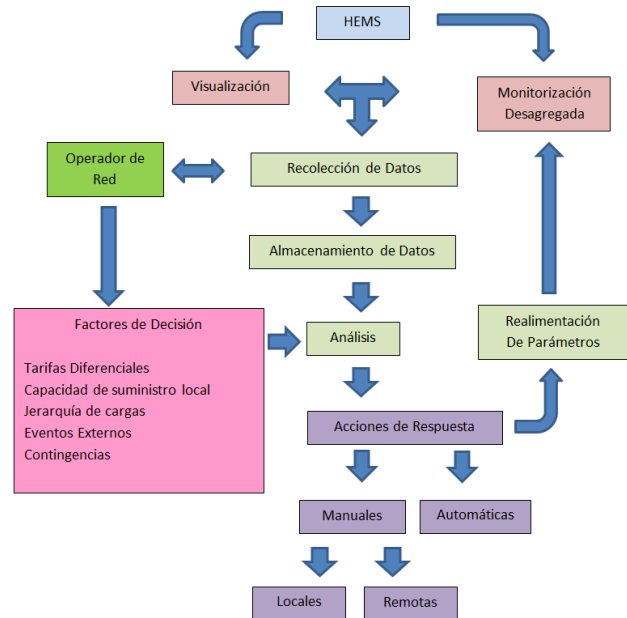


Figura 2 - Ciclo Cerrado de un Sistema de Gestión Energética Residencial – HEMS [8]

Los medidores, los puertos inteligentes y los generadores de energía a base de paneles fotovoltaicos y aero generadores son un ejemplo de actuadores. Las aplicaciones son las tareas específicas de uno a más actuadores enfocadas en los servicios de seguridad, monitorización de condiciones médicas, sistemas de gestión, etc.

Las alternativas tecnológicas buscan reemplazar el rol pasivo de los usuarios residenciales en contraste con la información y las múltiples variables de decisión que propician entre otros la migración de los picos de la demanda energética y la reducción de consumos mediante la jerarquía de cargas significativas, sensibles y especiales.

El enfoque tradicional de gestión energética residencial, se basa en sistemas eléctricos construidos en una estructura tipo árbol. La Figura 3 muestra la aproximación a la caracterización de la carga de uso final, basados en el resultado del estudio de caracterización de cargas de uso residencial de la UPME [1] y los aspectos anteriormente mencionados.

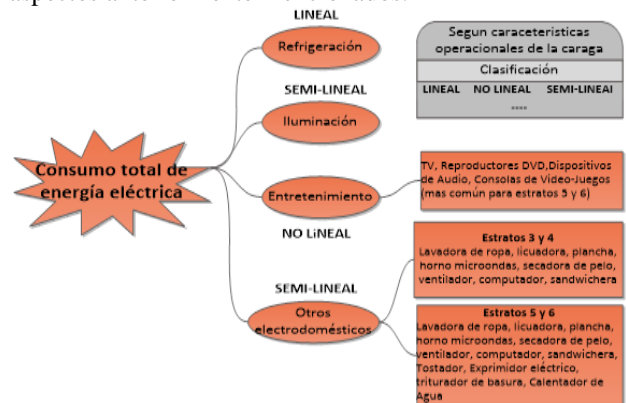


Figura 3 - Caracterización de la carga de uso final para usuarios residenciales [8]

La sub-medición, la monitorización y el control por circuito brindan una aproximación al consumo por aplicación en tiempo real, al igual que un nivel mediano de control y gestión. Los

sub-medidores y el módulo de monitorización y gestión (HUB), ubicados en el dominio del cliente se deben integrar a una central de datos y una interfaz “web-based”, soportadas por el operador de red (Figura 4).

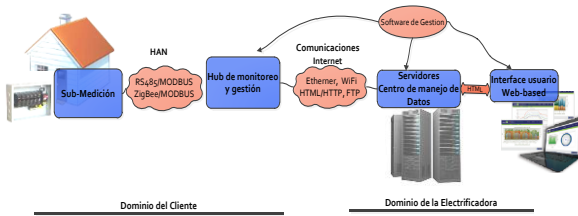


Figura 4 - Topología básica del sistema de gestión energética residencial [8]

La recolección de datos se realiza mediante dispositivos de sub-medida en los circuitos para brindar una buena aproximación al consumo desagregado.

La HAN apoya la recolección de datos mediante “Gateway” u otros dispositivos hacia la central de datos donde se realiza el procesamiento de la información.

El sub-medidor es similar a un medidor inteligente; tiene un módulo de medición de energía eléctrica para aplicaciones residenciales monofásicas, un módulo de almacenamiento de datos, un módulo de control, un módulo conmutador ON/OFF, un módulo de potencia y un módulo de comunicación como se muestra en la Figura 5. La mayoría de los sub-medidores se concentran en la medición de potencia activa a 120 V y en la transmisión inalámbrica o cableada de dichas medidas al “HUB” de monitorización y control.

La Tabla I [16] resume el sistema de gestión energética en función de la sub-medición por circuito de un usuario típico.

La propuesta de gestión energética residencial planteada se enfoca en usuarios de los estratos socioeconómicos 3 y 4. Se plantea un sistema eléctrico con capacidad de gestión e información de los consumos desagregados de energía eléctrica para lo cual se involucran dos conceptos: la distribución estratégica de circuitos ramales basados en las características de la carga y la sub-medición por circuito ramal. La propuesta comprende la distribución estratégica de circuitos ramales, la arquitectura, la funcionalidad y los beneficios.

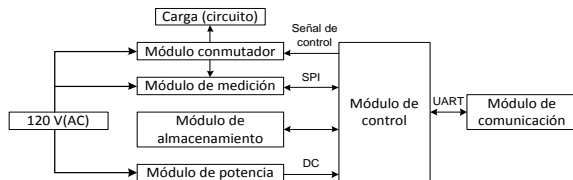


Figura 5 - Diagrama de bloques sub-medidor [12]

Tabla I. Síntesis del sistema de gestión energética basado en sub-medición por circuito [8]

SISTEMA DE GESTIÓN BASADO EN SUB-MEDICIÓN POR CIRCUITO	
Componentes	Características Funcionales
<b>Comunicación</b>	
RS485, Ethernet, WiFi	Dos dominios de comunicación, HAN y comunicación con la electrificadora.
<b>Actuadores</b>	
Sub-Medidor	Medición y control ON/OFF de energía eléctrica por circuito 120 V, [15-60A] , módulo de comunicación, dimensiones físicas consecuentes con tableros de distribución convencionales
HUB	Central de operaciones del sistema, manejo de datos de los sub-medidores, módulo de comunicación
Interfaz Usuario	Web-Based, concisa, versátil, agradable, interactiva y flexible en la presentación de datos y graficas de consumo, módulo de comunicación
<b>Aplicaciones</b>	
Retroalimentación al consumo	La configuración estratégica por circuitos según características de la carga permitirá al usuario una aproximación al consumo desagregado de sus aplicaciones, el usuario tendrá acceso a información de su consumo energético por circuito y cada circuito tendrá una desagregación de sus componentes en la interfaz usuario que permitirá al cliente gestión y retroalimentación sobre su consumo.
Monitorización y control por circuito	El sistema provee al usuario con una interfaz Web-Based con datos de su consumo de energía eléctrica por circuito en porcentaje del total, con sus respectivos dispositivos asociados. El usuario podrá ejercer gestión de sus aplicaciones por circuito.

Un referente importante en este estudio es la caracterización de los espacios mediante el análisis de la oferta inmobiliaria de Bogotá como un referente de las áreas construidas en cada unidad residencial. En este sentido se advierte una distribución genérica de tres alcobas, salón comedor, estudio o estar de TV y zona de ropas distribuidas en áreas entre 70 y 85 metros cuadrados. Adicionalmente, de acuerdo al estudio de la UPME, la Tabla II incluye la composición porcentual de consumos para los estratos 3 y 4.

Tabla II. Porcentajes de consumo promedio mensual de energía eléctrica para estratos 3 y 4 [1]

COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL CONSUMO MENSUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA		
Uso/Estrato	Estrato 3	Estrato 4
Iluminación	38,73%	26,05%
Refrigeración	36,54%	44,61%
Televisión	7,80%	11,36%
Otros Electrodomésticos	16,93%	17,98%
TOTAL	100,00%	100,00%

De acuerdo a esta composición porcentual la distribución estratégica de los circuitos ramales se indica en la Tabla III.

Tabla III. Desagregación de circuitos ramales [8]

CIRCUITO	NOMBRE	AREA DEL HOGAR	ELECTRODOMESTICOS
1	Iluminación.	Zona de ropas, Cocina, Sala-comedor, Estar de TV, Terraza.	Lámparas fluorescentes compactas LFC (26W) y lámparas dicroicas.
2	Iluminación.	Alcoba Principal, Alcobas Auxiliares, Baños.	Lámparas fluorescentes compactas LFC (26W).
3	Entretenimiento.	Estar de TV, Alcoba Principal y Auxiliares.	Televisores, Reproductores DVD, Dispositivos de Audio, Computador, Ventilador.
4	Plancha-Lavadora de ropa.	Zona de ropas.	Plancha y Lavadora de ropa.
5	Electrodomésticos de cocina.	Cocina.	Homo microondas, Licuadora, sanduchera.
6	Refrigeración.	Cocina.	Nevera.

Según la composición indicada, la Figura 6 muestra la arquitectura del sistema de gestión energética residencial basado en la sub-medición por circuito.

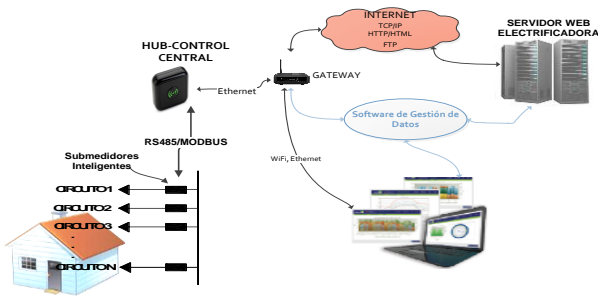


Figura 6 - Arquitectura eléctrica de Sub-medición por circuito [8]

La HAN tiene el sub-medidor inteligente, un “HUB”, una “Gateway” y un computador personal. Los sub-medidores inteligentes establecen comunicación con el HUB por medio de una conexión cableada (RJ45) usando el estándar RS485 y el protocolo ModBus de comunicación de datos, una vez en el HUB los datos son transmitidos vía Ethernet a la “Gateway”, la cual establece dos puentes para el flujo de datos: puede enviar y recibir datos a través del estándar TCP/IP y los protocolos HTTP/HTML, FTP vía internet con el servidor web de la electrificadora y a su vez establecer una red WiFi o cableada con el computador personal del usuario permitiendo al usuario la transmisión de sus solicitudes de control e información.

En un escenario de simulación real se deben corroborar los siguientes beneficios para el usuario:

- ❖ Costo diario del consumo de energía eléctrica.
- ❖ Definición de metas de ahorro de energía eléctrica y el análisis de información para verificar el cumplimiento de las mismas.
- ❖ Monitorización diaria de consumos energéticos desagregados por circuito.
- ❖ Control manual y remoto de cargas por circuito.
- ❖ Mensajes parametrizados y automáticos de los consumos energéticos.

Desde la perspectiva del operador de red deben lograr los siguientes beneficios:

- ❖ Consumo diario de energía eléctrica por usuario.
- ❖ Monitorización de parámetros de calidad de la energía suministrada a cada usuario.
- ❖ Información complementaria de dispositivos y artefactos de los usuarios, lo cual supone nuevas oportunidades de negocio por medio de los servicios contextuales.
- ❖ Disponibilidad de un canal de comunicación con el usuario.
- ❖ Infraestructura para propiciar el achatamiento de la curva de demanda diaria.
- ❖ Reducción del consumo de energía eléctrica sin sacrificar el confort de los usuarios.

#### IV. CONCLUSIONES

Los HEMS son el eslabón final de las redes inteligentes, son soportados por tecnologías de comunicación e información; muchas de las cuales se encuentran en proceso de afinación e integración, especialmente a las características de confiabilidad, flexibilidad y envergadura de la infraestructura

de medición de avanzada (AMI).

La gestión energética residencial debe ser una en el mediano plazo dado que se soporta en tecnologías de uso cotidiano y es una solución para la gestión de los consumos energéticos individuales y el mejoramiento de los hábitos de consumo de energía eléctrica.

Un aspecto complementario importante es la determinación de las características de los electrodomésticos y dispositivos eléctricos de uso final y los patrones de uso por tipo de usuario.

Adicionalmente un factor que aporta beneficios adicionales es la incorporación de un esquema de tarifa diferencial para usuarios domésticos.

La alternativa planteada en el propósito de una propuesta de gestión energética residencial se enmarca en el contexto del proyecto: HACIA UNA CIUDAD INTELIGENTE: DISEÑO DE UNA MICRORRED INTELIGENTE PILOTO – SILICE FASE III. Los resultados del modelado de la metodología de gestión planteada en el presente artículo hacen parte del aporte desarrollado actualmente por el grupo GISEL de la UIS.

#### REFERENCIAS

- [1] UPME, Proyección de Demanda de Energía en Colombia, Revisión Octubre de 2010, Ministerio de Minas y Energía 2010.
- [2] M. Energ, “Proyección de Demanda de Energía en Colombia,” 2010.
- [3] Widman, Richard y Linares, Omar. Compresores – Su funcionamiento y mantenimiento. Widman International S.R.L. Boletín #56. Abril /2008.
- [4] UPME, Plan de Expansión de Referencia - Generación y Transmisión – 2010 a 2024.
- [5] Goñi Zabala, Juan José, Mentefactura – El cambio del modelo productivo, Editorial Díaz de Santos, 2013, pp. 24-27.
- [6] K. Ehrhardt-Martínez, J. A. S. Laitner, and K. A. Donnelly, Beyond the Meter : Enabling Better Home Energy, no. 2010. Elsevier, 2011, pp. 273-303.
- [7] M. A. A. Pedrasa, S. Member, T. D. Spooner, and I. F. Macgill, “Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services,” *Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 134-143, 2010.
- [8] W. Gómez, G. Archila, Caracterización tecnológica de la topología de un sistema de gestión energética residencial, UIS – E3T, 2012.
- [9] K. Ehrhardt-Martínez, J. A. S. Laitner, and K. A. Donnelly, Beyond the Meter : Enabling Better Home Energy, no. 2010. Elsevier, 2011, pp. 273-303.
- [10] T. Ueno, R. Inada, S. Osame, and K. Tsuji, “Effectiveness of displaying energy consumption data in residential houses Analysis on how the residents respond,” pp. 1289-1299, 2005.
- [11] EPRI, “Residential Electricity Use Feedback: A Research Synthesis and Economic Framework”, 2009
- [12] Y. Zhao, W. Sheng, J. Sun, W. Shi, and A. S. Meter, “Research and Thinking of Friendly Smart Home Energy System Based on Smart Power,” *Appliance*, pp. 4649–4654, 2011.