

Sistema de medición centralizada en redes de distribución de baja tensión para la reducción de pérdidas eléctricas.

Central system metering on low voltage utility distribution networks to reduce the energy loss

Gabriel O. Plata¹, César A. Duarte², Jorge H. Ramon (Q.E.P.D.)³, Raul H. Cadena⁴, Wilmer Y. Jaimes⁵, Jhonattan F. Moreno⁶, Diana C. Carrillo⁷

¹GISEL, Esc. de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecom., Universidad Industrial de Santander, Colombia. gaby@uis.edu.co

²GISEL, Esc. de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecom., Universidad Industrial de Santander, Colombia. cedagu@uis.edu.co

³GISEL, Esc. de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecom., Universidad Industrial de Santander, Colombia. jhramons@uis.edu.co

⁴Área Proyectos, Centro de Excelencia Tecn., Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Colombia. raul.cadena@essa.com.co

⁵Área Proyectos, Centro de Excelencia Tecn., Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Colombia. wilmer.jaimes@essa.com.co

⁶Área Proyectos, Centro de Excelencia Tecn., Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Colombia. jhonattan.moreno@essa.com.co

⁷Área Proyectos, Centro de Excelencia Tecn., Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Colombia. diana.carrillo@essa.com.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 2, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 1, 2017

RESUMEN

El artículo presenta la descripción del sistema de medida centralizada fruto del trabajo conjunto entre la Universidad Industrial de Santander (U.I.S.) y la empresa Electrificadora de Santander (E.S.S.A. S.A. E.S.P.), el cual tiene como objetivo la detección, reducción y seguimiento de las pérdidas de energía eléctrica atribuidas a actividades indebidas como: manipulación de medidores y de las redes eléctricas.

El sistema fue diseñado e implementado considerando los nuevos esquemas de medición inteligente “Smart Metering” desarrollados a partir de los conceptos de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) y ajustado a las necesidades de ESSA. El sistema de medida centralizada permite realizar seguimiento en tiempo real sobre el consumo de energía eléctrica, vigilar la manipulación de equipos y gestionar la conexión de los clientes del servicio de energía eléctrica. En el documento se exponen principales características de este sistema y su impacto en la cultura de uso responsable del servicio de energía eléctrica; así mismo, se presentan otros productos y lineamientos derivados del desarrollo de este sistema de medición.

PALABRAS CLAVE: Medida centralizada, A.M.I., Smart Grid, consumo de energía eléctrica.

ABSTRACT

This article presents a description of the centralized electrical metering system developed by the Universidad Industrial de Santander (U.I.S.) and the company Electrificadora de Santander (E.S.S.A. S.A. E.S.P.) with the goal of detect, decrease and track the energy losses produced by manipulation of energy meters and distribution networks. The system was designed and implemented with the new smart metering's schemes as of concepts about advanced metering infrastructure(AMI) and adapted to ESSA's needs.

The centralized metering system can track the energy consumption in real time, check the meter status, tamper detection and manage the connection of customers to the electricity service. This paper presents the main characteristic of the ESSA-UIS centralized metering system and the impact in the culture about the responsible use of energy; in the same way, it presents others products and guidelines as a result of this development.

KEYWORDS: Centralized electrical metering system, A.M.I, Smart Grid, electric energy consumption.



1. INTRODUCCIÓN

Existe una problemática común en las empresas de distribución y comercialización de energía eléctrica dentro del mercado colombiano; se trata del desafío que trae la reducción y mantenimiento del índice de pérdidas de energía eléctrica. Este indicador relaciona la eficiencia en la entrega de energía al usuario final, determinado por la siguiente expresión:

$$IP = \left(\frac{E_{\text{Suministrada}} - E_{\text{Facturada}}}{E_{\text{Suministrada}}} \right) * 100 [\%] \quad (1)$$

Según [1] este índice¹ es fuertemente afectado por factores como: mantenimiento de redes, estado de equipos, estado de conexiones, factores ambientales, conexiones fraudulentas o irregulares, entre otras. Siendo las actividades de conexión fraudulenta las causales de una considerable pérdida de energía, que deja de ser cuantificada y facturada.

En escenarios ideales, se estima que este índice (1) esté alrededor del 7% debido a la pérdida de energía durante el transporte y distribución (llamadas pérdidas técnicas) [2] [3]. En la Tabla 1, se presenta la evolución del IP para el caso de la Empresa Electrificadora de Santander (E.S.S.A. S.A. E.S.P.).

Debido a la magnitud de las pérdidas de energía eléctrica, las empresas distribuidoras y comercializadoras de energía eléctrica deben mantener unos planes de reducción y control de éstas. Entre estos planes destaca la importancia de la implementación de sistemas de medida centralizada como herramienta para la reducción de las pérdidas de energía eléctrica.

A partir de la necesidad de contar con un sistema de medida centralizada adaptado a las necesidades de la empresa, es decir enfocado en la detección y mantenimiento de las pérdidas de energía eléctrica en tiempo real, en alianza entre E.S.S.A. y la Universidad Industrial de Santander (U.I.S.) se desarrolló el sistema SITELRED, el cual integra un sistema A.M.I. (Advanced Metering Infrastructure).

En el desarrollo de este documento, se presentará la motivación que dio origen al desarrollo de SITELRED, así como la descripción del sistema y los resultados obtenidos en algunos de los transformadores donde se ha instalado el sistema; haciendo énfasis en la importancia de la implementación de los sistemas A.M.I. para la identificación y control de las pérdidas de energía

eléctrica en tiempo real, además del impacto de estos sistemas en “la cultura de la legalidad”.

Tabla 1. Evolución histórica de las pérdidas de energía eléctrica y del índice de pérdidas para ESSA en el periodo 2010-2016.

Periodo	Energía eléctrica perdida por periodo [GWh]	Índice de pérdidas de energía para el periodo [%]
2010	447,10	19,78
2011	393,11	16,97
2012	340,55	14,07
2013	319,54	12,71
2014	317,97	12,09
2015	351,32	12,78
2016	330,80	12,19

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

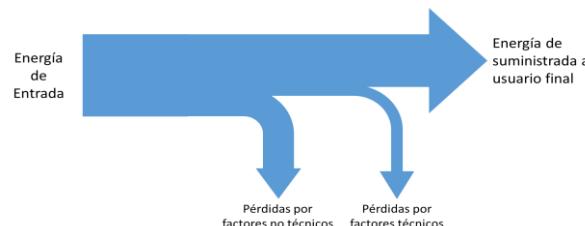


Figura 1. Flujo de energía en proceso de distribución comercial de energía eléctrica. **Fuente.** Elaboración propia.

Las pérdidas de energía eléctrica resultantes de la actividad de distribución de energía eléctrica están clasificadas en: pérdidas técnicas (PT) y pérdidas no técnicas (PNT), ver Fig. 1. La energía perdida por factores no técnicos se deja de comercializar ya que no llega (o no hay certeza de que llegue) al usuario final y resulta en pérdida de recursos para la empresa distribuidora de energía eléctrica.

Tabla 2. Causas de las pérdidas de energía eléctrica.

Pérdidas Técnicas	Pérdidas No Técnicas
Conducción.	Conexiones directas o fraudulentas.
Transformación.	Error de medición o en la toma de la lectura.
Equipos de medición.	Falla del medidor.
Mantenimiento de redes.	Facturación incorrecta.

¹ Para el caso de ESSA, en abril de 2017 esta componente de pérdidas representó aproximadamente 5,22% (92,4 GWh) de la energía total comercializada.

De acuerdo con [4] y [5], las PT pueden ser reducidas al implementar procesos de tecnificación, renovación, mantenimiento de las redes y equipos empleados en el proceso de transporte de energía eléctrica; en el caso de las PNT, se requieren actividades más demandantes, ya que el origen de estas pérdidas está ligado al factor humano, y debido a la dificultad de detección, la implementación de métodos tradicionales para la mitigación de las PNT se convierte en una solución mediática y que en la mayoría de casos no logran una sostenibilidad en el tiempo. La Tabla 2 presenta las causas de las pérdidas de energía eléctrica en la distribución de esta energía.

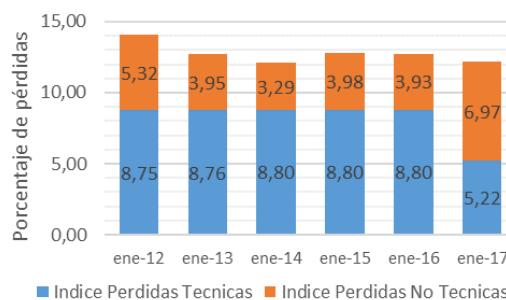


Figura 2. Índices de pérdidas anuales (PT y PNT) en el periodo 2012 – 2017 en E.S.S.A. **Fuente.** Elaboración propia.

Como se aprecia en la Fig. 2, los esfuerzos en E.S.S.A. por el control y mantenimiento de las pérdidas de energía en los pasados cuatro años, han logrado mantener el índice de PT cerca al hipotético índice esperado, como ocurre en los casos [2] y [6]; por el contrario, se aprecia que el índice de PNT ha resultado más difícil de reducir y mantener. La Fig. 2, muestra que el índice de PNT de 2015 es superior al mismo índice para los años 2013 y 2014, lo cual indica que se presentan dificultades en la detección y localización de las PNT (p.e. conexiones ilegales/irregulares y equipos de medición alterados o manipulados).

La búsqueda de tecnologías que contribuyan a detectar y reducir pérdidas no técnicas en los sistemas de distribución de energía eléctrica convierte a la medición por medio de sistemas centralizados (tipo A.M.I.) en una alternativa costo-eficiente, que puede traer otros beneficios adicionales con su implementación según [6], [7] y [8].

E.S.S.A. en alianza con U.I.S. ha trabajado en el desarrollo de un sistema centralizado de medición, SITELRED, el cual permite detectar oportunamente

acciones fraudulentas, que conllevan a la disminución del índice de pérdidas del transformador asociado, por medio de la monitorización y control de los consumos de los usuarios.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

SITELRED se diseñó para realizar el balance de consumo de energía eléctrica por cliente, es decir, para cada cliente el sistema compara la información registrada en el sistema comercial de E.S.S.A., con la información recopilada por los medidores inteligentes que conforman el sistema, para determinar a partir de la comparación de las mediciones, la existencia de pérdidas no técnicas de energía eléctrica (PNT principalmente, según [9]). La Fig. 3 muestra el esquema del sistema SITELRED.

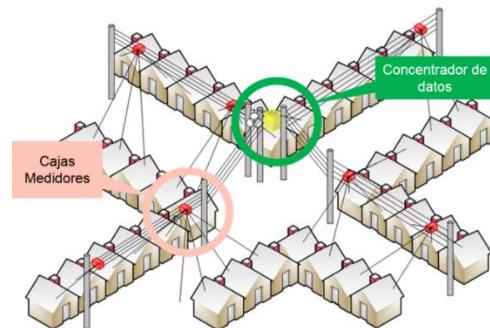


Figura 3. Esquema SITELRED desplegado in-situ. **Fuente.** Elaboración propia.

El desarrollo de este sistema de medición abarca desde la integración de tecnologías para la medición del consumo de energía eléctrica hasta la realización de protocolos de instalación, mantenimiento, acople con los sistemas comerciales de E.S.S.A y acompañamiento social con la comunidad intervenida.

El sistema de medida centralizada SITELRED está conformado por:

- *Medidores de energía monofásicos de conexión directa:* son medidores electrónicos ‘inteligentes’, siendo empleado uno por cada fase del cliente para medir el consumo de energía por fase. Estos son instalados aguas arriba² del medidor empleado para la facturación del consumo de energía eléctrica.
- *Caja de resguardo para medidores:* Con el ánimo de garantizar la confiabilidad del sistema, se desarrolló una caja que permite instalar seis medidores

² De esta forma, en caso de no haber pérdidas de energía, la diferencia entre la energía medida por medidor del usuario y el sistema de medida centralizada debe ser aproximadamente cero.

agrupados según los clientes que son monitorizados. Esto permite diferentes configuraciones según el tipo de cliente. Entre ellas: dos clientes trifásicos, tres clientes bifásicos, seis clientes monofásicos o cualquier otra combinación posible.

- *Módulo de comunicación inalámbrico:* cada caja cuenta con un módulo de comunicación inalámbrica que permite la comunicación bidireccional entre los medidores contenidos en la caja y un módulo de gestión de mediciones (se emplea un módulo por transformador)³
- *Modulo concentrador de datos:* este elemento se encarga de gestionar las mediciones y el control sobre los medidores⁴ hacia y desde el sistema de gestión de mediciones.
- *Sistema de gestión de mediciones:* se trata del conjunto hardware y software empleado para la gestión remota de las mediciones, que permite: la realización de balances para detección puntual de PNT, la programación de mantenimientos del sistema y la ejecución de corte/reconexión de usuarios⁵.

Como se aprecia en la Fig. 3, SITELRED realiza la medición redundante (se registra la medición del medidor de fachada del cliente y la medición del medidor ‘inteligente’) del consumo de energía eléctrica para cada cliente; luego la información es enviada vía radio hasta el concentrador de datos que organiza y envía por medio de un enlace inalámbrico 3G/4G (recomendado en [10]) al sistema de gestión la información relativa al consumo de energía eléctrica de cada cliente. Por último, una vez al mes, con el ingreso de los registros del sistema de facturación comercial⁶, es posible realizar el balance de pérdidas de energía eléctrica y generar la orden para intervención de las anormalidades detectadas.

Para validar el desempeño de SITELRED fueron seleccionados doce transformadores en diferentes áreas de influencia de E.S.S.A, con el fin de examinar el sistema en diferentes escenarios, características sociales, geográficas y naturales. Los criterios para la selección de los transformadores de distribución fueron:

- Un alto índice de pérdidas de energía eléctrica (IP superior al 10%).
- Transformadores que se habían intervenido anteriormente con algún método de reducción de pérdidas y hayan resultado ineficaces (transformadores reincidentes).

³ Se implementa una red ‘Zigbee Mesh’ tipo ‘Self-healing’, recomendada en [12] para este tipo de aplicaciones.

⁴ Tomando en cuenta que los medidores empleados permiten realizar corte y reconexión del suministro de energía eléctrica.

- Zonas en donde el factor social dificulte la intervención del sistema de medida.

Según estos criterios, fueron intervenidos los sitios presentados en las tablas 3 y 4 en las ciudades de Barrancabermeja y Bucaramanga.

Tabla 3. Transformadores ubicados en Barrancabermeja.

Barrio	Número de clientes
<i>Pueblo Nuevo</i>	97
<i>Jerusalén</i>	170
<i>Campana</i>	133
<i>Kennedy</i>	145
<i>Alpes</i>	25

Tabla 4. Transformadores ubicados en Bucaramanga.

Barrio	Número de clientes
<i>San Pio</i>	27
<i>Provenza</i>	74
<i>Cabecera</i>	27
<i>Concordia</i>	110
<i>Mejoras</i>	114
<i>Públicas</i>	
<i>Centro</i>	124

4. RESULTADOS

En este documento, se discutirán solo los resultados para los sitios intervenidos en Barrancabermeja por dos motivos: 1) Entre todos los sitios seleccionados, los ubicados en Barrancabermeja presentan un mayor IP, son transformadores reincidentes y son zonas de difícil manejo social y 2) En Bucaramanga se realizaron otras pruebas con pequeñas variaciones al sistema original, por lo tanto, los resultados de esta experiencia ameritan una discusión amplia en otro artículo.

Los transformadores intervenidos presentaron una disminución en sus pérdidas de energía eléctrica luego de ser instalado el sistema (resultados visibles después de 1 o 2 semanas posteriores a la instalación). La disminución de las pérdidas de energía eléctrica en estas primeras semanas se atribuye a un impacto social sobre la comunidad, ya que la detección e intervención de acciones fraudulentas se realizó después del primer mes

⁵ Por el momento, la acción de corte/reconexión solo se permite ejecutar durante mantenimientos por motivos legales y normativos.

⁶ Esto ocurre automáticamente, cuando se actualiza el sistema de gestión comercial de E.S.S.A.

de instalación. Una muestra del impacto al implementar este sistema AMI para control de pérdidas se apreció en el primer reporte de usuarios a intervenir por desviaciones de consumo que se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Detecciones acciones fraudulentas Barrancabermeja.

Barrio	Número de clientes
<i>Pueblo Nuevo</i>	5
<i>Jerusalén</i>	12
<i>Campana</i>	8
<i>Kennedy</i>	5
<i>Alpes</i>	1

Como se mencionó previamente, SITELRED estima la desviación entre la medición de consumo tomada en el medidor ‘inteligente’ y el consumo registrado en el sistema de información comercial para cada usuario. Con esta información se generan las alertas para la intervención focalizada de las cuentas de usuario con posibles actividades fraudulentas, contribuyendo a una disminución en gastos operativos (al realizar intervenciones puntuales) y la estabilización de las pérdidas de energía del transformador como se muestra en la Fig. 4. Adicionalmente, la implementación de este sistema genera sobre los usuarios la sensación de ser vigilados constantemente, por lo cual, la reincidencia en actividades fraudulentas también disminuye (Efecto también observado en [5] y [11]).

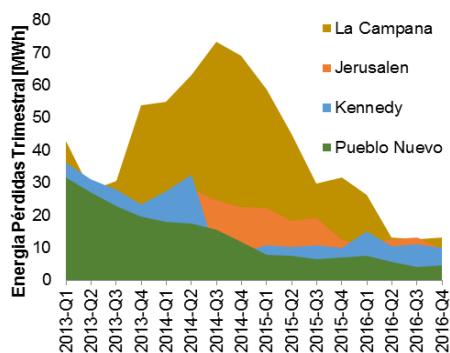


Figura 4. Evolución del índice de pérdidas en el periodo 2013 – 2016 para los sitios intervenidos en Barrancabermeja. **Fuente.** Elaboración propia.

En la Fig. 4 se observa que desde el momento que el sistema SITELRED entra en operación (agosto de 2014),

⁷ No se incluyen los resultados del sitio ‘Los Alpes’ debido al número de usuarios y a la ejecución de pruebas con sistemas redundantes para el control de pérdidas. Por lo tanto, los resultados en este sitio no son comparables con los demás sitios listados.

⁸ Esto equivale a una pérdida aproximada de \$ 208,3 Millones de pesos en el 2013 (tarifa 435,9 \$/kWh) y a una pérdida de \$ 96,8 Millones de

la tendencia del índice de pérdidas es a la baja⁷. En los casos ‘Pueblo Nuevo’ y ‘Jerusalén’ se demuestra como un sistema AMI, logra la reducción del IP. Sin embargo, sitios como ‘Kennedy’ y ‘La Campana’ no muestran cambios drásticos debido al factor social que dificulta la intervención a usuarios, sumados a la persistente cultura del consumo fraudulento de energía eléctrica.

La Fig. 5 consolida los datos anuales del IP para cada uno de los sitios intervenidos, en donde se aprecia el impacto causado por SIELRED en la reducción de pérdidas.

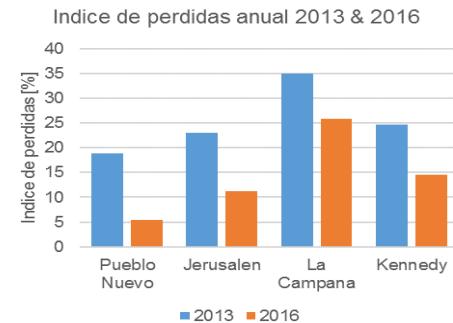


Figura 5. Índices de pérdidas anuales para los sitios intervenidos en Barrancabermeja. **Fuente.** Elaboración propia.

En la Tabla 6 se presenta la comparación entre las pérdidas anuales totales entre 2013 y 2016 en donde se evidencia la reducción de los IP para cada uno de los sitios intervenidos, en donde se pasa del 25,35% al 14,27%⁸ en el IP promedio de los sitios intervenidos, una reducción poco mas de seis puntos porcentuales. Esto representa una recuperación de 297 MWh⁹ para un total de 545 clientes con el sistema SITELRED instalado en la ciudad de Barrancabermeja.

Tabla 6. Pérdidas de energía eléctrica anuales para los sitios intervenidos en el periodo 2013 – 2016.

Sitio	2013	2016
<i>Jerusalén</i>	103,8 MWh	46,4 MWh
<i>Kennedy</i>	118,4 MWh	46,7 MWh
<i>Pueblo Nuevo</i>	100,8 MWh	22,2 MWh
<i>La Campana</i>	154,7 MWh	65,2 MWh
Energía Total	477,8 MWh	180,6 MWh

pesos en el 2016 (tarifa 536 \$/kWh) en un total de 545 usuarios intervenidos.

⁹ Diferencia entre las pérdidas totales del 2013 contra las pérdidas totales del 2016; significa una recuperación promedio de casi 100 MWh.

5. OTROS RESULTADOS

En el desarrollo de esta solución, adicionalmente se generaron dos resultados que resultan en aportes importantes, como lo son:

5.1. Caja multipropósito.

Se diseñó y fabricó un modelo de caja que permite la instalación de una variedad de equipos e instrumentos en diferentes modos de uso, de tal forma que pudiese servir para prácticamente cualquier dispositivo. Esta caja ha sido especialmente empleada para la instalación de los equipos del sistema SITELRED. En la Fig. 6 se aprecian un caso típico en la instalación de la caja, mostrando parte de su funcionalidad.

Debido a la versatilidad y carácter innovador de esta caja, se ha solicitado la patente de la misma ante la Superintendencia de Industria y Comercio.

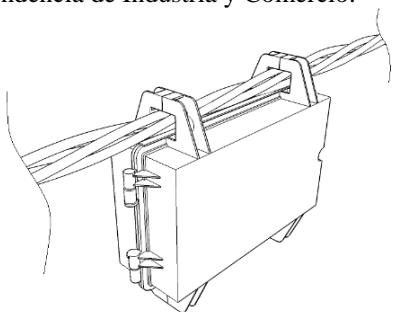


Figura 6. Caja multipropósito colgada sobre red eléctrica.
Fuente. Elaboración propia

5.2. Sistema de medición por ramales de BT.

Se trata de un sistema A.M.I. que emplea medidores trifásicos 'inteligentes' de medición indirecta, dispuestos de tal forma que se registren los consumos de energía en los diferentes ramales y sub-ramales de baja tensión de un transformador al que se quiera realizar seguimiento de los consumos de energía eléctrica, para generar los balances de flujo de energía.

6. CONCLUSIONES

En este documento se han presentado las características de un sistema de medición centralizada en redes de distribución de baja tensión para la reducción de pérdidas de energía eléctricas que ha sido concebido, diseñado y realizado a partir de la sinergia entre la Universidad Industrial de Santander y la Empresa Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.

El sistema fue diseñado utilizando nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica, bajo la filosofía de los sistemas Smart Metering y está a la altura de soluciones comerciales que se vienen desarrollando a nivel mundial

para optimizar los procesos técnicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

El sistema de medida centralizada, utiliza modernas tecnologías de comunicación para llegar hasta los usuarios, permitiéndole a la empresa administrar el servicio de distribución de energía con las siguientes ventajas: medición remota de consumos de energía, desconexión manual y automática de usuarios y seguimiento de consumos consolidados por transformador de distribución, lo cual le facilita a la empresa de energía la detección de fraudes. Además, el sistema da la posibilidad de ofrecer a los usuarios servicios como el seguimiento detallado de sus consumos de energía y energía prepago.

Con este proyecto quedó demostrado que la vinculación entre la academia y el sector productivo puede generar resultados de investigación de alto impacto que den solución a problemas de la industria nacional.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del personal de ESSA que ha tenido vinculación con el desarrollo de este sistema, en especial a los ingenieros: Laura Isabel Rodríguez, Carlos Andrés Suárez, Edison Yesid Martínez, Geffrei Rincón, Ana María Vargas y otros funcionarios que se comprometieron en el soporte durante el desarrollo de la solución. También es importante realizar un reconocimiento póstumo al profesor Jorge Hernando Ramón Suárez (QEPD), líder indiscutible de este desarrollo. Gracias a su visión y persistencia hasta el momento de su partida se han logrado los resultados de este sistema.

8. REFERENCIAS

- [1] A. Agha y A. Alfaoury, "Comercial losses in jordanian electrical system (Case Study)," de *13Th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, Leipzig, 2016.
- [2] G. T. Heydt, "The Next Generation of Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, nº 3, pp. 225 - 235, 2010.
- [3] M. Madrigal, J. J. Rico y L. Uzcategui, "Estimation of technical energy losses in electrical distribution systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, nº 10, pp. 3310 - 3316, 2015.
- [4] J. R. Agüero, "Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction," de *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, San Diego, 2012.



- [5] M. Anas, N. Javaid, A. Mahmood, S. M. Raza, U. Qasim y Z. A. Khan, "Minimizing electricity theft using smart meters in AMI," de *Seventh International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC)*, Victoria, 2012.
- [6] A. Khazaee y M. Ghasempour, "Distribution loss minimization: A case study in a commercial section in Mashhad," de *22nd International conference and exhibition on electricity distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, 2013.
- [7] J. Triplett, S. Rinell y J. Foote, "Evaluating distribution system losses using data from deployed AMI and GIS systems," de *IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Orlando, 2010.
- [8] P. Rengaraju, S. R. Pandian y C.-H. Lung, "Communication networks and non-technical energy loss control system for smart grid networks," de *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Kuala Lumpur, 2014.
- [9] P. Mukhopadhyay y H. K. Chawla, "Approach to make Smart Grid a reality," de *International conference on advances in energy conversion technologies (ICAECT)*, Manipal, 2014.
- [10] J. Garcia-Hernandez, "Recent Progress in the Implementation of AMI Projects: Standards and Communications Technologies," de *Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, 2015, Cuernavaca, 2015.
- [11] H. L. M. do Amaral, D. S. Gastaldello, F. Fernandes y Z. Vale, "Smart meters as a tool for energy efficiency," de *2014 11th IEEE/IAS International conference on industry applications (INDUSCON)*, Juiz de fora, 2014.

