



# Sistema de Gestión de Energía en Tiempo Real del Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

*\*Por: David L. Alvarez, Juan F. Reyes, William Montaña and Estrella E. Parra*

## Abstract

La transformación de los sistemas de energía en sistemas inteligentes y controlados es una tendencia mundial que se ha venido desarrollando al interior de los campus universitarios. Universidades alrededor del mundo han dispuesto sus instalaciones para la implementación de redes inteligentes con el objetivo de dar a conocer un ambiente completamente funcional de las Smart-Grids y demostrar la amplia aplicabilidad que éstas tienen. Este documento describe la implementación de una plataforma de gestión energética en tiempo real al interior del campus de la Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá. Su implementación es llevada a cabo como parte del proyecto de investigación titulado “Laboratorio Nacional de Redes Inteligentes en el Campus Universitario lab+i”. El desarrollo de esta plataforma tiene como objetivo dotar al campus universitario de una infraestructura que permita la integración de las diferentes tecnologías y elementos que hacen parte de una Smart Grid, así como establecer una metodología de pruebas, tanto de software como de hardware, para la evaluación de la funcionabilidad y desempeño de estas tecnologías como conjunto. Para lograr esto se hace necesario contar con sistemas de medida, de comunicación, de almacenamiento de información y de análisis lo suficientemente abiertos, que permitan la integración de cualquier tipo de tecnología o equipo sin importar sus características particulares.

## Palabras claves

Smart Grids (SG), Campus Inteligente, Estimación de Carga, Medición Inteligente, Sistema de Gestión de Energía (EMS).

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes inteligentes o Smart Grids (SG) han incursionado en todas las etapas del sistema eléctrico, generación, transmisión, distribución y usuario final, desarrollando nuevas tecnologías que permiten optimizar desde el punto de vista económico y ambiental el consumo de energía eléctrica.

Las universidades como centros de aprendizaje, transferencia y desarrollo tecnológico se han enfocado en desarrollar campus sostenibles, basados en la gestión inteligente de la energía y la eficiencia energética. Este es el caso del proyecto que adelanta la unión europea SMART CAMPUS [1], el cual busca desarrollar servicios y aplicaciones a través de una plataforma de información en tiempo real con el fin de administrar de una manera inteligente los sistemas de energía en edificios de universidades, buscando reducir hasta un 20% el consumo energético. Uno de los objetivos del proyecto es que los usuarios tomen conciencia y transformen las prácticas de consumo de energía a través de información accesible en tiempo real, creando una cultura de eficiencia energética. Los pilotos de este proyecto se encuentran en las ciudades de Helsinki, Lulea, Lisboa y Milán.

La universidad Lappeenranta University of Technology en Finlandia desarrolla el proyecto Green Campus Smart Grid [2] con el fin de implementar, investigar y demostrar las funcionalidades de las SG en redes de baja tensión. El objetivo principal del proyecto es promover y mejorar la eficiencia energética en el campus universitario. Los principales componentes de Green Campus son: generación distribuida, cargas controlables, vehículos eléctricos y un

sistema de gestión de energía (EMS), siendo éste último el componente esencial de la SG. EMS de Green Campus está basado en SQL, en esta base de datos reposa información acerca de perfiles de carga estimados, datos para el pronóstico del clima y datos históricos de consumo, cargas críticas y demás información necesaria para el control de la SG, con el fin de optimizar la operación del sistema. El objetivo principal del EMS es aplanar la curva de carga.

En el Reino Unido Birmingham City University (BCU) [3] está desarrollando dos nuevos campus bajo el concepto de edificios inteligentes, con el objetivo de reducir el consumo de energía. Con la implementación del EMS se reporta una reducción del 40% en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En [4] se desarrolla una plataforma en la nube buscando caracterizar el comportamiento del consumo energético con el fin de analizar y predecir la demanda de energía en el tiempo en un ambiente de campus. Las fuentes de información del EMS son: el sistema de meteorología, sensores (medidores inteligentes), información de los edificios y el número de ocupantes.

Oregon State University (OSU) Corvallis cuenta dentro de su campus con medidores inteligentes, unidades de medición fasorial PMU y EMS, permitiéndole operar como una SG a través de sistemas de cogeneración y celdas fotovoltaicas, logrando optimizar el consumo energético [5].

En el campus King Abdulaziz University (KAU), Jeddah, Saudi Arabia se implementó un EMS [6] con el objetivo de reducir el consumo energético. La mayor cantidad de energía del campus se concentra en iluminación y aire acondicionado por lo que es necesario tomar medidas con el fin de optimizar estos procesos. Para la implementación EMS utilizaron mediciones en tiempo real, precios dinámicos, control directo

de carga en los campus; todo esto buscando implementar un sistema de gestión de demanda.

En [7] se hace un análisis del estado de los EMS en las universidades Chinas, haciendo una descripción de los principios que deben seguir; orientación hacia las personas, prioridad en la conservación, localización del mercado, entre otros.

Cada campus Universitario posee características tanto únicas como comunes [8], tales como ubicación geográfica, objeto del campus, tipo de laboratorios, cultura de las personas; por esta razón, bajo el laboratorio de redes inteligentes de la Universidad Nacional de Colombia lab+i [9] se decidió desarrollar una plataforma de gestión energética del campus basado en el modelo de referencia de redes inteligentes propuesto en [10]. En la figura 1 se observa el modelo en capas de un EMS característico de una SG formulado para el campus universitario.

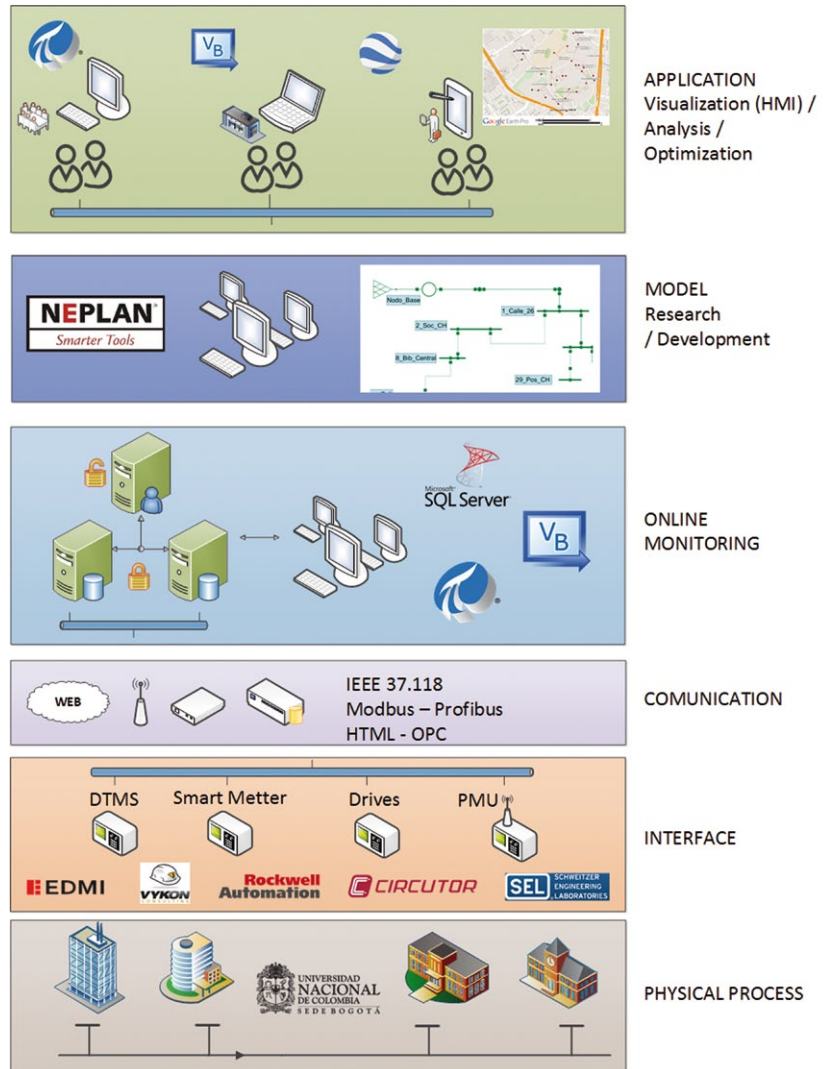


Fig. 1. Capas del EMS dentro de la SG en el campus UNAL, sede Bogotá

Uno de los aspectos fundamentales para la gestión energética de cualquier sistema es el manejo de los datos, siendo fundamental en los EMS pues de la veracidad de los datos transmitidos y almacenados dependerá la

AUTOMATIZACIÓN

funcionabilidad del EMS; por lo que se requiere de una plataforma de software lo suficientemente robusta que permita optimizar el almacenamiento, la integridad, la seguridad y la consulta de la información en todo momento, aun ante una falla en las comunicaciones. Esto hoy en día es posible gracias al desarrollo e innovación de la ingeniería de software y de los sistemas de comunicación.

Los sistemas de medición destinados a la gestión de energía en edificios deben diseñarse desde dos puntos de vista diferentes [8], por un lado se encuentra las necesidades del administrador del edificio y por el otro lado se encuentran las necesidades de los usuarios. En [8] se propone una serie de indicadores y características que deben contener la gestión en los laboratorios del campus.

El sistema de gestión debe permitir realizar monitoreo, análisis y simulaciones de la red [8] por medio de la información recolectada y almacenada en históricos del campus universitario. Todas estas características se han procurado desarrollar al interior del Laboratorio de Redes Inteligentes de la Universidad Nacional, lab+i.

El presente artículo está dividido en V secciones. En la sección II se hace una descripción de la red eléctrica utilizada para la ejecución del proyecto, así como los equipos de medición utilizados y su respectiva ubicación dentro de la red. En la sección III se describe la estructura establecida para la construcción del EMS implementado en el campus a través de lab+i y la información suministrada a los diferentes agentes del sistema. En la sección IV se presenta el método de estimación de carga utilizado por la herramienta NEPLAN® con el cual se estiman las variables en los nodos en los cuales no se tienen mediciones. Por último en la sección V se presentan las conclusiones del presente trabajo.

**II. RED ELÉCTRICA DE PRUEBA**

**A. Descripción del Sistema Eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.**

La Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia es un complejo educativo conformado por aproximadamente 120 edificios que representan un área total ocupada de 116.000 [m2], la cual alberga un total de 11 facultades y 49 programas educativos de pregrado; esto la posiciona como el campus universitario más grande de la ciudad de Bogotá.

Debido a su gran tamaño, el campus universitario cuenta con una red eléctrica de media tensión independiente que se conecta con el sistema eléctrico nacional por medio de 2 circuitos externos, uno de estos es el circuito que conecta con la subestación de la Registraduría Nacional y el otro el que conecta con la subestación de la calle 26 con carrera 39, ambos circuitos se conectan a la red de la universidad por medio de la subestación de la calle 26, la cual cuenta con una celda de transferencia automática que permite cambiar la conexión del circuito del campus a cualquiera de los dos circuitos externos.

El campus dispone en su interior de una red eléctrica con topología de anillo de una longitud aproximada de 3 [km], la cual se distribuye a lo largo y ancho del campus por ductos subterráneos. Esta red está conformada por 33 subestaciones eléctricas que se interconectan por medio de 53 buses. De estas 33 subestaciones, 28 son de tipo local, 1 tipo poste y 4 de tipo capsuladas. Cada una de las subestaciones cuenta con sus respectivas celdas de protección y de medida y con un transformador trifásico de conexiones Dyn5, los cuales en su mayoría son refrigerados por aceite (tabla I). Los niveles de tensión de los transformadores son de 11.4 [kV] por el lado de alta y 214 [V] o 440 [V] por el lado de baja tensión y su potencia oscila entre los 75 [kV A] y 400 [kV A]. Las características físicas de los conductores que interconectan las subestaciones se muestran en las tablas II y III. En la figura 2 se puede observar la red la red eléctrica de media tensión del campus Universitario (11.4 [kV]).

Tabla. I  
SUBESTACIONES ELECTRICAS DEL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE BOGOTÁ

No.	Subestación	Potencia Transf. kVA	No.	Subestación	Potencia Transf. kVA
1	Calle 26	112.5	18	Unid. Computo	150
2	Sociología	112.5	19	Lab. Veterinaria	112.5
3	Manuel Ancizar	225	20	Cine y TV	75
4	Enfermería	225	21	Química	225
5	Almac. Auxil.	300	22	Farmacia	150
6	ICTA	500	23	Hidráulica	150
7	Posg. Veterinaria	150	24	Observatorio	300
8	Bibliot. Central	400	25	Ciencias Naturales	112.5
9	Arquitectura	225	26	Genética	112.5
10	Economía	225	27	Taller Manten.	400
11	Uriel Gutierrez	400	28	IICA	75
12	Camilo Torres	300	29	Posg. Humanas	225
13	Humbolt	150	30	UNI Salud	112.5
14	Medicina	112.5	31	CyT	225
15	Posg. Math. y Fisic.	300	32	Odontología	112.5
16	Ensay. Hidraulicos	75	33	Fac. Ingeniería	225
17	Resist. Materiales	150			



Tabla. II  
CONDUCTORES PARA LINEAS AEREAS

Conductor	Resistencia a 20 C ohm/km	Radio mm	RMG mm
4/0 ACSR	0, 261	4, 77	4, 61
2/0 ACSR	0, 416	3, 78	3, 65

B. Ubicación de los equipos de medida

Uno de los aspectos característicos que diferencia las Smart Grids de los sistemas eléctricos tradicionales es la capacidad de permitir una mayor observabilidad del sistema, característica fundamental en las labores de monitoreo en tiempo real y estimación de estado dinámico de los sistemas. Una red se dice que es observable si se puede obtener de ella un número suficiente de medidas, tales que estas permitan determinar los estados del sistema [11]. Una forma de lograr observabilidad es mediante la instalación de equipos de medida en cada uno de los nodos del sistema, de manera que se puedan obtener de forma directa los parámetros característicos de cada uno de los nodos. Este procedimiento aunque válido, es muy costoso y probablemente inviable para los operadores de red, pues se incurre en costos de compra de equipos, instalación, operación y mantenimiento. Adicionalmente, se debe tener en cuenta las facilidades de comunicaciones, pues en algunas ocasiones el costo de la infraestructura de comunicaciones que se necesitan implementar en el sistema pueden llegar a ser mayor que el costo de los equipos.

Tabla. III  
CONDUCTORES PARA LINEAS SUBTERRANEA

Conductor	Resistencia a 20 C ohm/km
4/0 Cu	0, 164
2/0 Cu	0, 261

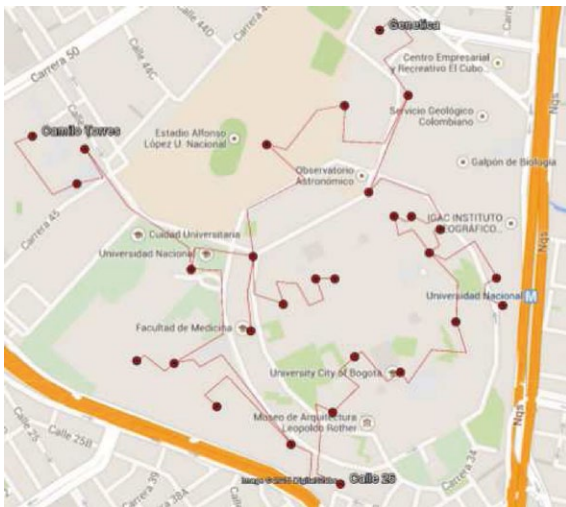


Fig. 2. Ubicación física de las subestaciones dentro del campus y sus respectivas conexiones

Como consecuencia de las restricciones económicas y la posibilidad de realizar pseudo-medidas han motivado a los ingenieros e investigadores a encontrar mecanismos que les permitan establecer el número mínimo de nodos de un sistema en los cuales deben ser instalados equipos de medida para garantizar que éste sea observable. Diferentes métodos y algoritmos han sido propuestos con el fin de establecer la ubicación óptima de las PMU's en un sistema de potencia. Se han desarrollado métodos para condiciones normales de operación del sistema [12]–[14], métodos que analizan el sistema bajo condiciones de falla [15], [16], métodos para lograr una observabilidad completa e incompleta del sistema [12], entre otros.

Los diferentes métodos pueden agruparse en tres diferentes grupos, según el tipo de algoritmo que utilicen [17], algoritmos de tipo numérico, algoritmos de tipo topológico y los algoritmos de tipo híbrido. Para este trabajo se decidió optar por el método que utiliza algoritmos de tipo topológico. Los métodos que utilizan estos algoritmos se centran en encontrar por medio de la ubicación óptima de PMU's un árbol de expansión de medidas de rango completo que permita la implementación de sistemas de monitoreo de área amplia (WAMS). Bajo este criterio se dice que un sistema es topológicamente observable si contiene por lo menos un árbol de expansión de medida de rango completo [17]. Para la ubicación óptima de equipos en el campus se utiliza el método de programación lineal entera (ILP), el cual busca definir un conjunto mínimo de medidores de tal manera que un nodo debe ser alcanzado como mínimo por un medidor para que sea observable [18], [19]. Aunque, como se mencionó anteriormente, estos métodos contemplan diferentes posibles escenarios del sistema. Para este proyecto se acoto la implementación del algoritmo para las siguientes características:

- Se considera el caso en que se desea obtener una observabilidad completa del sistema.
- Se cuentan con medidas no convencionales del sistema obtenidas a partir de PMU's.
- El sistema se encuentra permanentemente bajo condiciones normales de operación.
- No hay pérdida física o el enlace de comunicaciones de alguno de los equipos instalados.
- Configuración de los límites de consumo.
- No se implementara redundancia en las medidas del sistema.

Estas características se establecen teniendo en cuenta que se dispone de una cantidad limitada de equipos, que se cuenta con sistemas de gestión de la información que permiten el almacenamiento temporal de la información ante fallas en las comunicaciones y que se puede realizar una supervisión constante de los equipos de medida para prevenir su falla o pérdida.

Los resultados obtenidos con el desarrollo de este método se muestran en la figura 3.

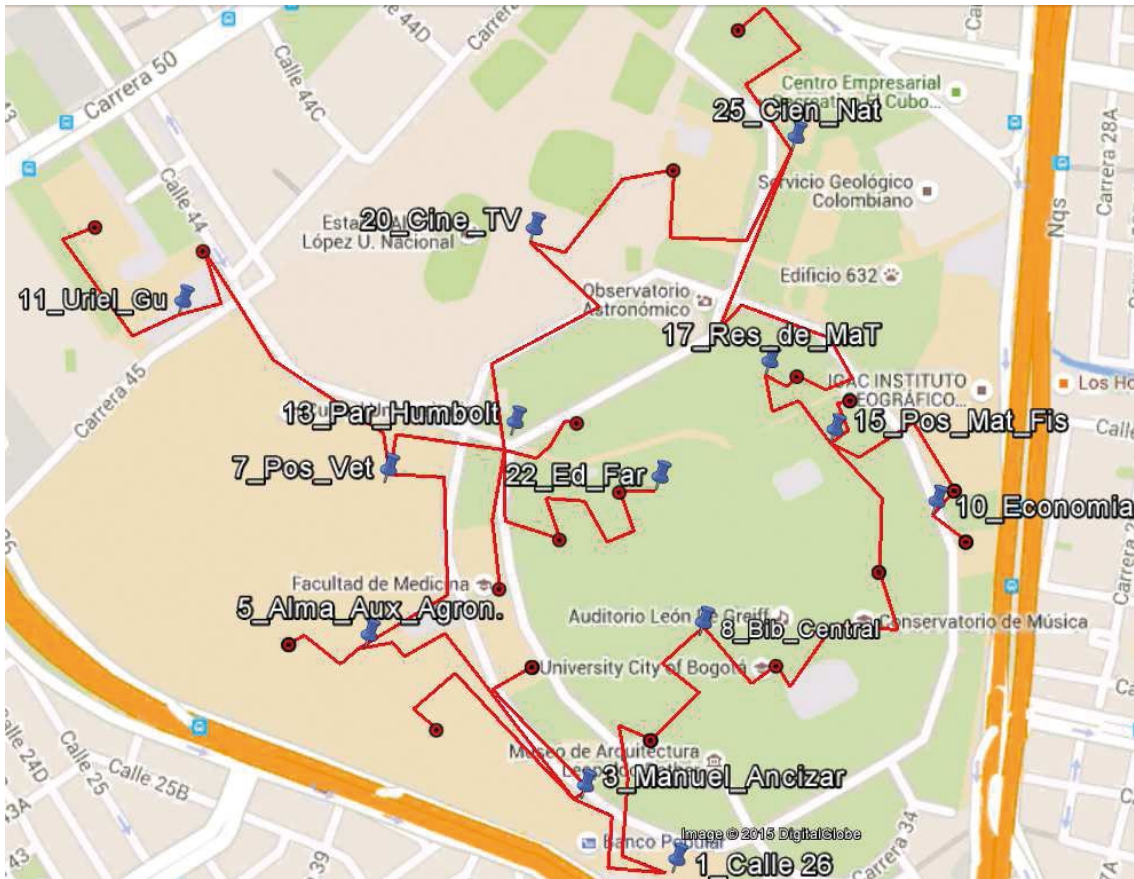


Fig. 3. Subestaciones eléctricas en las que deben ser instalados los equipos de medida para lograr una observabilidad completa de la red

C. Equipos de Medida

De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección II-B, para la implementación del proyecto es necesario hacer la instalación de 13 equipos de medida en los puntos previamente identificados. El listado de equipos instalados se presenta en la tabla IV.

Aunque los análisis de observabilidad descritos en las referencias indicadas en la sección II-B utilizan como equipos de medida únicamente PMU's, por disponibilidad de equipos, se instalaron únicamente 3 PMU's y se complementaran el número restante de equipos con los mencionados en la tabla IV.

Tabla. IV  
EQUIPOS DE MEDICION DEL EMS

Equipo	Fabricante	# de Equipos
Smart Meter	CIRCUTOR	3
	EDMI	4
	Rockwell Automation	1
DTMS	WOO KWANG TECH	2
PMU	SEL	3

III. SISTEMA DE GESTIÓN EN TIEMPO REAL - EMS

A. Estructura

El sistema de gestión en tiempo real de lab+i está basado en la plataforma  $\pi$ -system®, la cual permite coleccionar, almacenar, gestionar, analizar y visualizar información en tiempo real o de manera histórica proveniente de diferentes fuentes de datos. Dentro de las principales características del software se incluye la flexibilidad para integrarse con diferentes herramientas y aplicaciones mediante desarrollos de software. Otra característica importante que ofrece la plataforma es la flexibilidad que posee para integrar los diferentes protocolos de comunicación y fuentes de información utilizados ampliamente en el sector eléctrico e industrial.

Los indicadores principales y características de un EMS propuestos en [8] para un campus universitario son:

- Energía consumida total y de cada equipo
- Energía consumida por usuario
- Indicadores de calidad: SAIDI y SAIFI
- Descarga y análisis de la información medida
- Configuración de los límites de consumo



- Muestra de estado y características de equipos instalados.

Basados en los anteriores indicadores es posible desarrollar modelos y algoritmos con el fin de implementar estrategias de optimización y eficiencia en el consumo energético del campus.

### B. Monitoreo / Aplicación

Para el desarrollo de las herramientas de visualización y análisis del sistema de gestión de energía se deben identificar los tipos de usuarios los cuales hacen uso de EMS. La clasificación de usuarios es la siguiente:

- Usuarios de dirección y gestión
- Usuarios Operativos
- Usuarios Finales

Para cada tipo de usuario involucrado es necesario diseñar y desarrollar herramientas visuales visualizaciones según los principales intereses y necesidades de cada uno.

#### 1) Dirección y gestión:

- Informes económicos: Estos informes presentan un resumen económico del funcionamiento general del sistema, cuantificando de manera general e individual de la energía consumida y el costo en cada uno de los elementos del sistema.
- Comportamiento de la demanda: A partir de los valores históricos almacenados se presentan los perfiles de carga del sistema en general y de cada uno de los elementos que lo conforman. Con esta información se busca brindar herramientas que permitan a la dirección tomar decisiones buscando optimizar del consumo energético y la estructura de la red.
- Informes de gestión de activos: Estos informes presentan un resumen de los activos instalados en el sistema, sus características fundamentales, ubicación, planes de mantenimiento y su funcionamiento a corto, mediano y largo del tiempo.

#### 2) Área Operativa:

- Monitoreo en tiempo real de la red: Con esta visualización se busca una representación esquemática del sistema, que permite observar el comportamiento de los parámetros característicos de la red en tiempo real.
- Gestión de Alarmas: Este indicador se basa en el monitoreo en tiempo real de las restricciones del sistema, generando alarmas sobre comportamientos inadecuados o anormales del sistema.

- Restablecimiento de fallas: Por medio de la posición georeferenciada de los elementos del sistema y los valores en tiempo real de sus parámetros característicos, se puede identificar de forma rápida cuando un elemento presenta una falla, permitiendo la ubicación exacta del elemento para su pronta reparación.

- Gestión de activos: Reportes sobre el funcionamiento de los activos que se encuentran instalados en el sistema, permitiendo gestionar el ciclo de vida de los activos.

#### 3) Usuario Final:

- Consumo Total: Total de energía consumida durante determinado periodo de tiempo junto con los costos económicos y ambientales.
- Hábitos de consumo: Análisis del comportamiento en el consumo del usuario.

### IV. ESTIMACIÓN DE CARGA

El proceso de estimación de carga procesa los datos de las mediciones obtenidas por dispositivos tales como medidores inteligentes o unidades de medición fasorial con el fin de estimar las magnitudes y los ángulos de fase de la tensión en los nodos, del sistema de potencia en estudio, en donde no se pueden obtener estas mediciones.

Con los valores conocidos de las mediciones, el estimador de estado evalúa los nodos de la red que tienen mediciones y calcula los valores estimados de las tensiones del sistema que deberían estar presentes en los puntos sin medición, Figura 4.

Los cálculos se basan en la combinación de las medidas obtenidas y las curvas de demanda de los históricos estadísticos de varios tipos de carga, presentes en el sistema de energía, con características similares para cada circuito del sistema. Para este caso se emplea el software de cálculo NEPLAN®, el cuál calcula los flujos de potencia del sistema usando un balance de carga, esto hace referencia a que el algoritmo realiza un ajuste de los factores de simultaneidad de las curvas de carga sintéticas (tipos de perfiles de consumidores; por ejemplo estadísticos o históricos) con el fin de cumplir con las medidas de potencia actuales, en la figura 5 se puede observar la red modelada en NEPLAN®. Lo que garantiza que el balance de carga ayude a decidir las cargas de los transformadores de distribución cuando la cargabilidad máxima en una red radial se conoce; es decir que las cargas cambian automáticamente a medida que el flujo de carga se adapta de la mejor manera al comportamiento de los valores medidos [20].

Fig. 4. Proceso de estimación de carga basado en mediciones del EMS

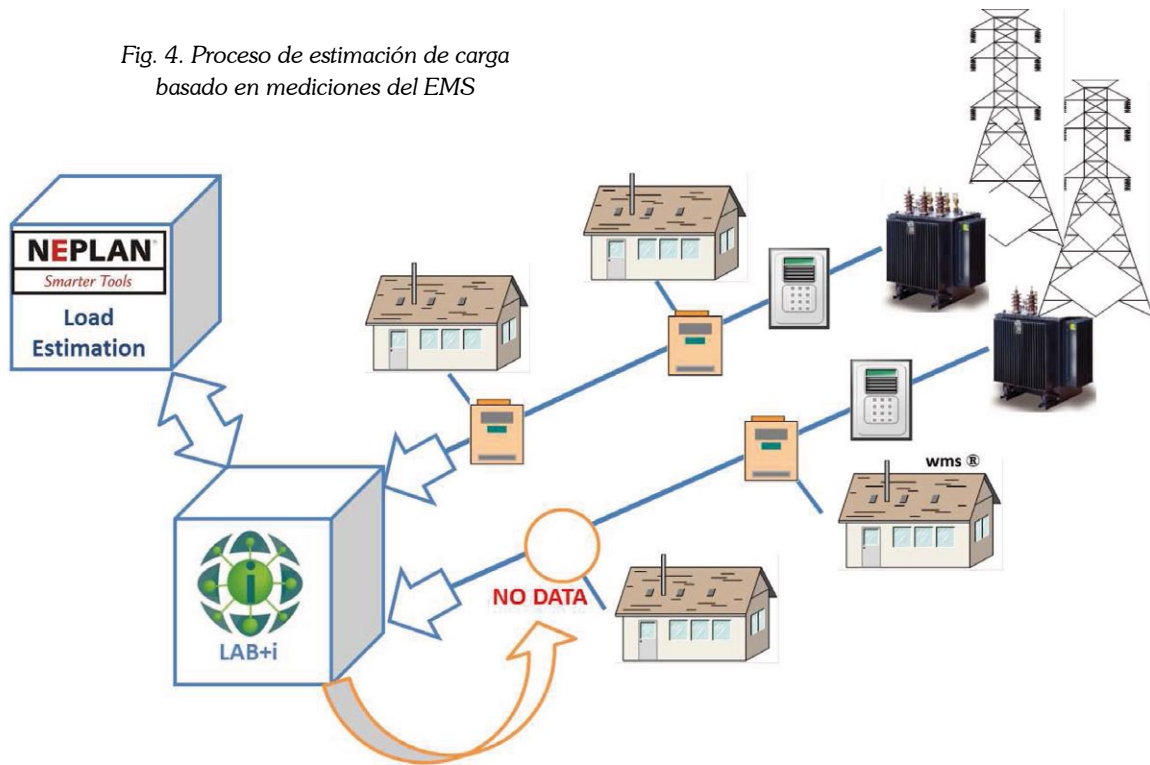
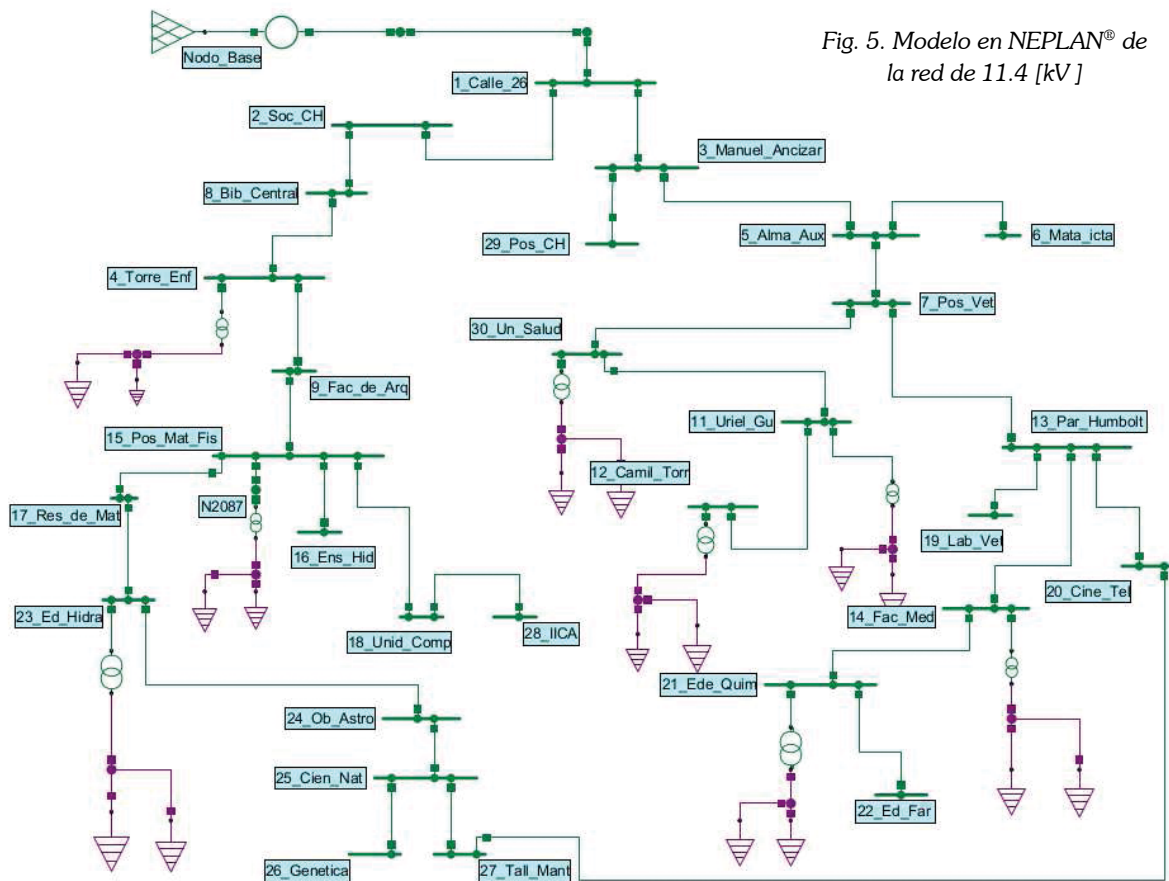


Fig. 5. Modelo en NEPLAN® de la red de 11.4 [kV]



El uso de los perfiles de carga sintéticos permite una estimación de estado de red confiable, incluso con un bajo número de mediciones de la red de media tensión [21]. En trabajos anteriores realizados por Peter VINTER y Hans KNUDSEN [21] y [22] se muestra la solución llamada SmartPIT la cuál provee una cantidad significativa de información sobre el estado de la red gracias a la solución que determina todos los flujos de potencia, las cargas de los transformadores y las tensiones de los barrajes en toda la red de media tensión cada diez minutos, empleando cálculos que se basan en la combinación de las medidas obtenidas en tiempo real y las basadas en las curvas de carga sintéticas por medio de balances de carga.

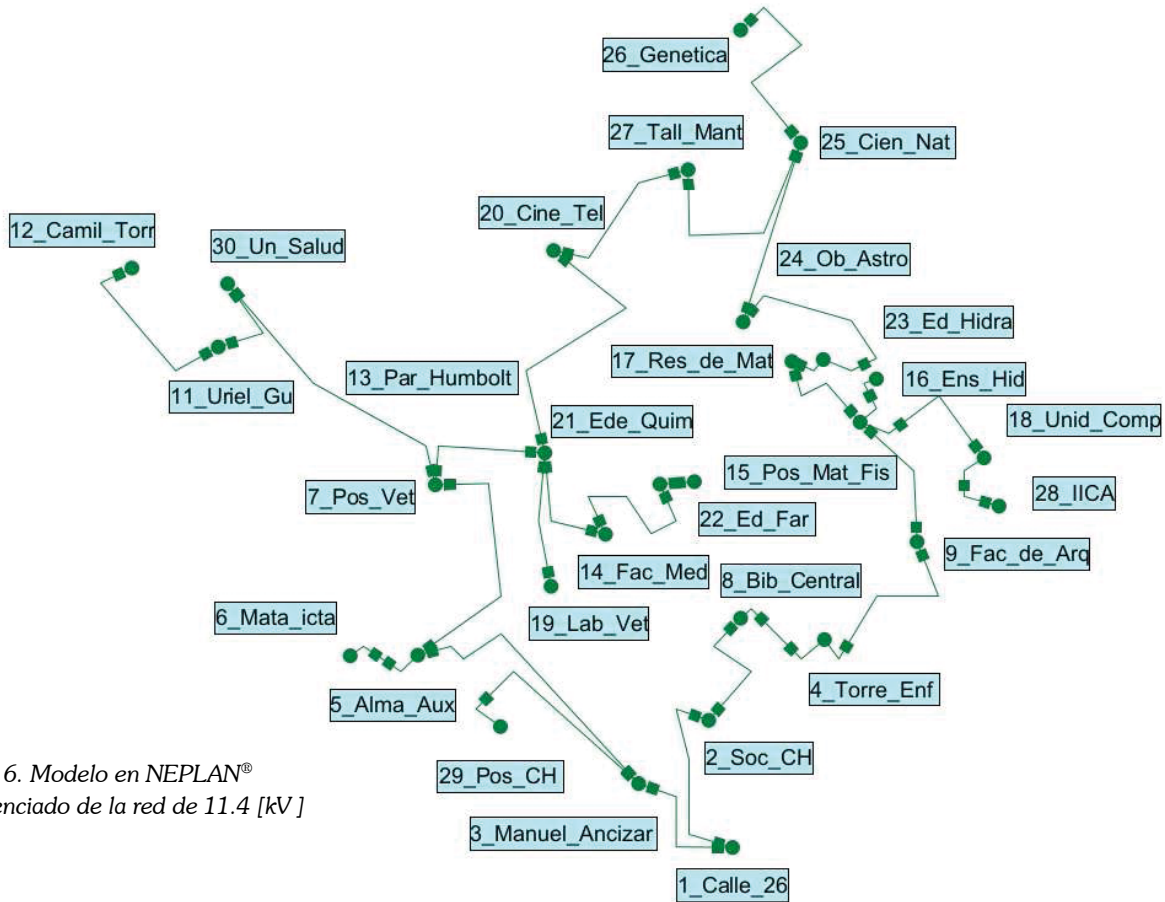


Fig. 6. Modelo en NEPLAN® georeferenciado de la red de 11.4 [kV]

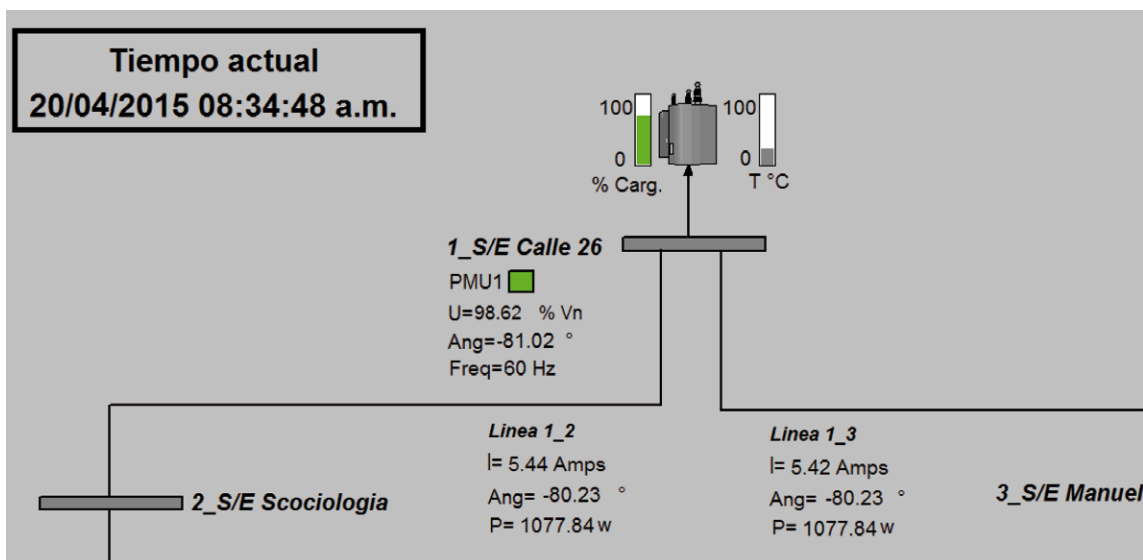


Fig. 7. Monitoreo en tiempo real de los parámetros del sistema a través de Processbook, pi – system®



Como se mencionó en la sección IV, debido a que no se cuenta con mediciones en todas las subestaciones de la universidad, se utilizan técnicas de estimación basadas en mediciones. En la figura 6 se presenta la red de media tensión georeferenciada utilizando NEPLAN®.

En la figura 7 permite visualizar la interfaz del EMS, donde se observa en tiempo real el valor de las principales variables de la zona donde se encuentra ubicada la subestación de la calle 26, junto con la carga del transformador y topología de la red.

Mediante el EMS implementado a través de lab+i es posible analizar el comportamiento de la carga de la universidad y de cada uno de los edificios, mediante comparaciones entre diferentes subestaciones o en diferentes fechas, como se observa en la figura 8, permitiendo desarrollar estrategias de gestión de demanda y energética.

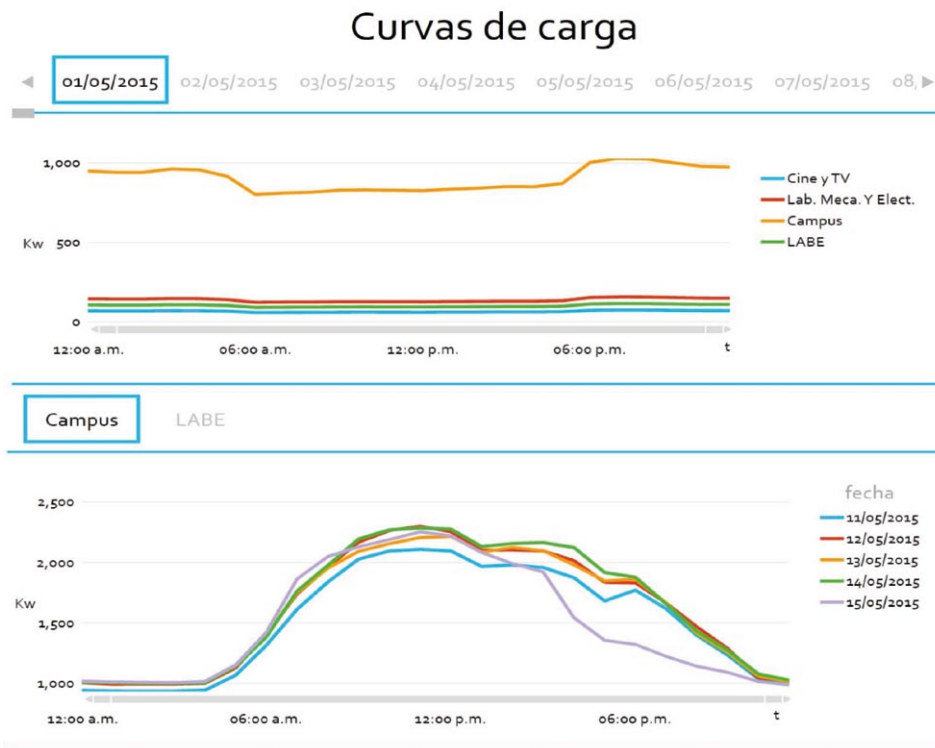


Fig. 8. Informe sobre el comportamiento histórico de las cargas de la red mediante pi – system® y Power View y Power Pivot de Excel.

## V. CONCLUSIONES

El modelo de la red inteligente en cual está basado lab+i permite de manera eficiente y clara incorporar EMS dentro del campus universitario.

EMS permite la interacción directa y en tiempo real entre los usuarios y el consumo de energía, logrando crear un cultura de eficiencia energética entre la población y los futuros profesionales, los cuales tendrán en sus manos decisiones fundamentales para la sociedad.

Las universidades como fuentes de innovación y desarrollo están implementado EMS dentro del marco de las SG con el objetivo de presentar las beneficios sociales, económicos y ambientales a la comunidad académica y al público en general.

El sistema de gestión de información del EMS posee capacidad de adquirir los datos de los procesos físicos, almacenarlos, analizarlos, evaluar indicadores y establecer estrategias de gestión con el objetivo principal de incrementar la eficiencia de la red.

Con la implementación de EMS dentro del campus universitario es posible aplicar técnicas de gestión de la demanda, con el fin de optimizar las nuevas fuentes de energía renovable y nuevas cargas, que cada vez están aumentando en el campus, como es el caso de las bicicletas y vehículos eléctricos. ☺

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a las empresas OSIsoft®, Omnicon y GERS® por su aporte al desarrollo del proyecto.

## REFERENCES

- [1] Alfamicro, "SMART CAMPUS – Building-User Learning Interaction for Energy Efficiency." [Online]. Available: <http://greensmartcampus.eu/>
- [2] H. Makkonen, V. Tikka, J. Lassila, J. Partanen, and P. Silventoinen, "Green Campus, Energy management system," in Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on, Jun. 2013, pp. 1–4.
- [3] S. Hipwell, "Developing smart campuses - A working model," in Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), 2014 International Conference on, Apr. 2014, pp. 1–6.
- [4] S. H. Shah Newaz, J. H. Yang, A. F. Y. Mohammed, G. M. Lee, and J. K. Choi, "A web based energy cloud platform for campus smart grid for understanding energy consumption profile and predicting future energy demand," in Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2014 International Conference on, Oct. 2014, pp. 173–178.
- [5] C. Huo, J. Song, K. Wagner, G. Harold, and E. Cotilla-Sanchez, "Integrating synchrophasor technology with the Oregon State University campus smart grid project," in Technologies for Sustainability (SusTech), 2014 IEEE Conference on, Jul. 2014, pp. 125–129.
- [6] I. M. Jomoah, A. U. M. Al-Abdulaziz, and R. S. Kumar, "Energy management in the buildings of a university campus in Saudi Arabia - A case study," in Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, May 2013, pp. 659–663.
- [7] A. Si-jiang, "Status and countermeasures of energy management in China's college," in Materials for Renewable Energy Environment (ICMREE), 2011 International Conference on, vol. 2, May 2011, pp. 1922–1926.
- [8] S. Kusakabe, H. H. Lin, Y. Omori, and K. Araki, "Requirements Development of Energy Management System for a Unit in Smart Campus," in Advanced Applied Informatics (IIAIAI), 2014 IIAI 3rd International Conference on, Aug. 2014, pp. 405–410.
- [9] S. Tellez, D. Alvarez, W. Montano, C. Vargas, R. Cespedes, E. Parra, and J. Rosero, "National Laboratory of Smart Grids (LAB+i) at the National University of Colombia-Bogota Campus," in Transmission Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T D-LA), 2014 IEEE PES, Sep. 2014, pp. 1–6.
- [10] R. Cespedes, "A reference model for the electrical energy system based on Smart Grids," in Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES, Sep. 2012, pp. 1–6.
- [11] B. Gou, "Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, 2008.
- [12] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.
- [13] R. Sodhi and S. C. Srivastava, "Optimal PMU placement to ensure Observability of Power System," 2008 Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), no. December, pp. 1–6, 2009.
- [14] J. S. Bhonsle and a. S. Junghare, "A Novel Approach for the Optimal PMU Placement using Binary Integer Programming Technique," International Journal of Electronics Engineering (IJEEE), pp. 67–72, 2012.
- [15] K.-P. Lien, C.-W. Liu, C.-S. Yu, and J.-A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 21, no. 3, pp. 1128–1136, 2006.
- [16] K. Mazlumi, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and S. S. Geramian, "Determination of optimal PMU placement for fault-location observability," in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, 2008, pp. 1938–1942.
- [17] S. P. S. Pradeep S. Chauhan, "Optimal PMU Placement in Power System Networks Using Integer Lineal Programing," International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, pp. 523–528, 2014.
- [18] B. Xu and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," in Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, Oct. 2004, pp. 943–946 vol.2.
- [19] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, "Probabilistic Multistage PMU Placement in Electric Power Systems," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 2, pp. 841–849, 2011.
- [20] ABB, "Planning and optimization system for electrical, gas, water and district heating networks," 2005.
- [21] P. Vinter, "Dong Energy - Towards the Intelligent Utility Network," CIRED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution, no. 0037, pp. 23–24, 2008.
- [22] P. Vinter, Knudsen H, H. Knudsen, and P. Vinter, "Using continuous state estimation in grid planning," CIRED 20th International Conference on Electricity Distribution, no. 0435, pp. 8–11, 2009. [Online]. Available: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2009.0749>

**\* David L. Alvarez, Juan F. Reyes, William Montaña and Estrella E. Parra**  
**Electrical Machines & Drives Group,**  
**EM&D, Department of Electric and**  
**Electronics Engineering Universidad**  
**Nacional de Colombia, Sede Bogotá,**  
**Bogotá, Colombia**  
**[dalvarez@unal.edu.co](mailto:dalvarez@unal.edu.co) - [jfreyesm@unal.edu.co](mailto:jfreyesm@unal.edu.co) -**  
**[wmontanos@unal.edu.co](mailto:wmontanos@unal.edu.co) -**  
**[eepparral@unal.edu.co](mailto:eepparral@unal.edu.co)**