

Una formación de calidad
en ingeniería para el futuro

Centro de Convenciones Cartagena de Indias
15 al 18 de Septiembre de 2015

DESARROLLO Y COMPARACIÓN DE ALGORITMOS PARA LA CLASIFICACIÓN Y MODELACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA DE LOS MUNICIPIOS DE NARIÑO

**Camilo Ernesto Pazmiño, Gabriel Esteban Narváez Morales, Wilson Olmedo Achicanoy
Martínez**

**Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia**

Resumen

La clasificación y modelación del consumo de energía eléctrica, para una región en particular, ofrece la posibilidad de realizar un estimado de su demanda y, mediante la aplicación de políticas energéticas nacionales y regionales, asegurar el suministro necesario para la demanda industrial, comercial y residencial de dicha zona. También ofrece la posibilidad de fundamentar y estructurar proyectos que pudiesen llevar soluciones de energía eléctrica a los lugares donde ésta, por diferentes razones, no se presta. En este trabajo se busca clasificar las poblaciones de El Departamento de Nariño y modelizar su demanda.

Para realizar una adecuada clasificación de los municipios del departamento de Nariño, de acuerdo con el consumo de energía eléctrica que éstos presentan y de acuerdo con variables socioeconómicas que los describen, se compara varios algoritmos de agrupamiento automático estudiados en el área del aprendizaje de máquinas. Los resultados de cada algoritmo son analizados y se selecciona el más adecuado para los objetivos de esta investigación. El método utilizado para realizar la mencionada clasificación se conoce como *clustering*. Debido al tipo de información que se tiene disponible para los municipios de la zona interconectada de Nariño, la clasificación se realiza en dos etapas: en la primera se utiliza la información de variables categóricas, y el mejor resultado agrupa los municipios de la zona interconectada de Nariño en cuatro clusters. En este trabajo los clusters resultantes son llamados regiones. En la segunda etapa se realiza una clasificación interna para cada región; lo que resulta en una desagregación de los municipios que conforman cada región.

Palabras clave: clasificación; agrupamiento automático; aprendizaje de máquinas; modelos de demanda eléctrica

Abstract

Classification and modeling of electric energy consumption, for a specific region, offer the possibility of predict its electric energy demand and, by means of national and local policies, ensure the supply that is needed for the industry, commerce and residential consumption into the location. In addition, it allows the possibility of construct projects oriented to give solutions of electric energy to places where the service is still not provided.

To accomplish with an appropriate classification of Nariño's municipalities, based on the electric energy consumption and socioeconomic variables that describe each region, some clustering algorithms, studied in the machine learning field, were analyzed. Results of each algorithm were analyzed and the best outcome was chosen according to the purposes of this work. The method that was used to the classification is known as clustering. Due to the nature of the available information for each Nariño's municipality of the interconnected area, the classification is done in two stages: In the first one, we used the information of categorical variables and the clustering method classify the Nariño's municipalities in four clusters, which are called regions. In the second one, a new internal classification is made to classify every municipality into the region and taking the characteristics of each region into account.

Keywords: *classification; clustering; machine learning; electric energy demand*

1. Introducción

La creciente dependencia a los aparatos electrónicos en la vida cotidiana, el trabajo y las actividades diarias, hacen necesario que se garantice el suministro de energía con calidad y de forma constante. Surge entonces, la necesidad de clasificar y modelar la demanda eléctrica para poder prever el consumo futuro y ofrecer un servicio adecuado para los usuarios y mejorar la rentabilidad para los comercializadores, distribuidores y trasmisores de la misma. En Colombia existen zonas que carecen de interconexión con las redes eléctricas nacionales, situación que implica una problemática social y económica pues dificulta el acceso de la población a herramientas de educación, trabajo, comunicación y comercio que este servicio permite suscribir. Nariño cuenta con una vasta zona de comunidades afectadas por esta problemática, y que debido a diferentes tipos de dificultades, entre otras: falta de carreteras, presencia de grupos armados ilegales y desidia del estado, se ve imposibilitado para superarla.

Actualmente se desarrollan múltiples iniciativas encaminadas a solucionar esta problemática, puesto que esto implica, oportunidades de educación y de trabajo para un gran número de familias (Benavente, Galetovic, Sanhueza, & Serra, 2005). El nivel y

precisión de planificación que se proponga en estas soluciones va a depender de los datos que se utilicen en la toma de decisiones. Frente a la disponibilidad de datos más precisos, los resultados serán más fiables. Sin embargo, bien conviene acotar que uno de los mayores problemas que se plantea en la resolución de cualquier ejercicio de electrificación rural en países en vías de desarrollo se debe a la carencia de datos o a la disponibilidad de los mismos. Entendiendo esto, la metodología propuesta en este trabajo puede ser una herramienta bastante adecuada para efectuar un análisis hasta un nivel de pre-factibilidad o inclusive hasta de factibilidad (Rojas Zerpa, 2012) en un proyecto de electrificación rural.

En Nariño se llevan a cabo actualmente dos proyectos enfocados a la solución de las problemáticas causadas por la falta de electricidad en algunas poblaciones. En primer lugar, el Plan de Energización Rural Sostenible para el Departamento de Nariño (PERS-Nariño) busca evaluar los lineamientos de política energética en la región e identificar, formular y estructurar proyectos integrales y sostenibles en el corto, mediano y largo plazo, y que se incluyan en las políticas de planeación del país (Departamento de Ingeniería Electrónica - Universidad de Nariño, 2012). Por otra parte, y en etapa de ejecución, se encuentra el proyecto "Análisis de Oportunidades Energéticas con Fuentes Alternativas en el Departamento de Nariño -ALTERNAR-", este proyecto es la primera fase de un programa a largo plazo que pretende contribuir a la definición de nuevos modelos de gestión energética para mejorar la cobertura en zonas apartadas y/o no interconectadas de Nariño. El fin de esta iniciativa es proponer un esquema de aprovechamiento integral y sostenible de los recursos locales para la generación de energía alternativa mediante la investigación en tecnologías de redes inteligentes y microrredes aplicadas a zonas rurales, abordando los retos del cambio climático, el uso racional de la energía y la solución de las necesidades socioeconómicas propias de cada región (Departamento de Ingeniería Electrónica - Universidad de Nariño, 2015). El trabajo que se realiza en esta investigación se soporta en algunos de los resultados del PERS-Nariño y se encamina a satisfacer el objetivo de estudio de demanda del proyecto ALTERNAR.

2. El Departamento de Nariño

Nariño se ubicado al suroccidente de Colombia, limitando al norte con el departamento de Cauca, al sur con la República de El Ecuador, al oriente con el departamento de Putumayo y al occidente con el Océano Pacífico. Nariño es atravesado de sur a norte por la cordillera de Los Andes y cuenta además con un pequeño porcentaje de territorio ubicado en la Región Amazónica. Por sus muchas y muy diversas características, el departamento es clasificado en subregiones. La división más general que se realiza es la geográfica donde se encuentran tres grandes subregiones: Llanura del Pacífico, Cordillera de Los Andes y la Vertiente Amazónica. La Llanura Pacífica representa el 52% del territorio departamental. La subregión de la cordillera de los Andes ocupa el 46% del territorio departamental y su relieve montañoso alcanza alturas cercanas a los 5000 m.s.n.m. El 2% restante del territorio corresponde a la vertiente Amazónica, que se caracteriza por su vegetación selvática y de altas

precipitaciones. Ésta última subregión está vinculada económicamente al departamento de Putumayo (Viloria de la Hoz, 2007)

El Departamento de Nariño tiene una extensión de 33.268 km², que corresponde al 2.9% del territorio nacional. Lo conforman 64 municipios, que debido a las particularidades del territorio, se encuentran ubicados a diferentes altitudes y presentan características significativamente diferentes, tanto en aspectos geográficos como económicos y sociales. Este hecho repercute en el análisis de la demanda de la energía eléctrica de cada municipio, puesto que introduce variables de diferentes tipos al estudio y que se tratan más adelante. Del total de los municipios del departamento, 54 pertenecen exclusivamente a la zona interconectada a la red eléctrica nacional¹ (ZI), 6 pertenecen a la zona no interconectada (ZNI) y 4 se encuentran en las dos zonas (Achicanoy Martínez, 2014)

Nariño es un departamento cuyo territorio puede denominarse mayormente rural con altos niveles de pobreza y diferencias económicas y sociales muy marcadas entre los distintos municipios que lo conforman. En su mayoría, la economía departamental depende del sector agropecuario.

3. Variables para la clasificación

La identificación y clasificación de escenarios de consumo energético para el Departamento de Nariño, por las características antes mencionadas, necesita la recopilación de diversa información. Se debe contar con series de tiempo representativas de los consumos energéticos, que permitan realizar un análisis de su comportamiento y establecer su tendencia, además se requiere de datos socioeconómicos de los municipios que permitan plasmar una clasificación más acertada según las características propias de cada región. Debido a la heterogeneidad existente en el departamento, son muchas las variables que podrían adoptarse para clasificar los municipios; sin embargo, debido a la dificultad para conseguir información detallada y confiable, y tras los análisis realizados y las pruebas hechas utilizando herramientas informáticas, se seleccionan algunas de estas variables como las más representativas para el propósito de esta investigación. Los resultados de dichas pruebas se evaluaron directamente por el grado de fiabilidad de los resultados de la clasificación con los métodos escogidos para tal fin.

Respecto al consumo de energía eléctrica, se cuenta con una base de datos disponible en la plataforma del Sistema Único de Información de Servicios Públicos –SUI-². En dicha plataforma se encuentra disponible información de consumo mensual de energía eléctrica en kilovatios hora al mes (kWh/mes), discriminada para cada municipio de la zona interconectada (ZI) y, a su vez, por cada una de las empresas que prestan el servicio en cada uno de ellos. Adicionalmente, la información reportada se

¹ El Sistema Interconectado Nacional (SIN) está compuesto por las plantas y equipos de generación, la red de interconexión, las redes regionales e interregionales de transmisión, las redes de distribución y las cargas eléctricas de los usuarios (Artículo 11 de la Ley 143 de 1994).

² <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/logon.jsp>

clasifica por estrato y por tipo de suscriptor, es decir, se diferencia el consumo residencial, comercial e industrial. Además de la información antes descrita, en esta plataforma se encuentra información sobre el número de suscriptores para cada municipio organizada de manera similar a la información sobre el consumo. Los datos adquiridos para la presente investigación corresponden al periodo comprendido entre enero de 2003 y septiembre de 2014.

Para la clasificación de los escenarios de consumo de energía eléctrica, la información socioeconómica de los municipios juega un papel importante, y pese a que no existe una fórmula que relacione directamente los indicadores económicos con la forma en que las personas hacen uso de la electricidad, se evidencia, por medio de un análisis de varianza y covarianza de la información disponible, que están relacionados, tal y como se discute más adelante. Los índices con los que se cuenta en esta investigación, y que fueron facilitados por el Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Empresarial CEDRE³ de la Universidad de Nariño, son: Ruralidad, miseria y necesidades básicas insatisfechas. Por otra parte, al considerarse que la economía del Departamento depende en gran medida de la agricultura, la ganadería, la pesca y otras actividades relacionadas con actividades agropecuarias, se incluye información sobre estos ítems en los parámetros de clasificación. Estas variables, aunque no son totalmente sociales, tienen fuerte injerencia en las otras variables sociales y económicas de la población; pues está estrechamente relacionada con la capacidad actual y potencial de los beneficiarios de un proyecto para generar ingresos, y también asocian la gestión productiva actual y potencial de las comunidades en su interacción con los recursos naturales, agentes del mercado, patrones de ingresos (estacional, ingreso monetario y no monetario).

Variabes como las anteriores tienen efectos trascendentales en la sostenibilidad de los proyectos, pues influyen directamente en la capacidad de pago, en la pobreza y en los riesgos financieros que puede tener un proyecto. Estas variables influyen estrechamente en otras variables e indicadores económicos como: nivel de desempleo, estabilidad de los recursos, inmigración, niveles de salarios y otras (Arriaza, 2005), que a pesar de no ser utilizadas directamente en este estudio, son variables de alto impacto en el comportamiento de consumo de las personas.

La información disponible fue recolectada de diferentes fuentes y no toda es del mismo tipo, para el caso de los reportes de consumo de energía eléctrica y cantidad de suscriptores, por ejemplo, se trata de series de tiempo; mientras que los índices de tipo socioeconómico antes mencionados, provistos por el CEDRE de la Universidad de Nariño, se presentan como datos transversales correspondientes al año 2011. De esta manera, toda la información utilizada para la clasificación pertenece a este mismo año, ya que la cantidad de datos disponibles es más completa en relación con otros años.

³ Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Empresarial de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad de Nariño.

4. Clasificación

En muchos casos en los que es necesario extraer y analizar características de un conjunto de datos, la programación directa puede resultar muy complicada al tratar de especificar la forma correcta en que esto debe hacerse. Los sistemas de aprendizaje ofrecen un método alternativo para superar esta situación. A través de la información extraída de los datos de muestra, dichos sistemas son capaces de adaptarse e inferir una solución para esas tareas. En general, el campo del análisis de patrones estudia sistemas que usan la metodología de aprendizaje para descubrir patrones en los datos. Dentro del campo del aprendizaje de máquinas existen dos formas principales de aprendizaje: el supervisado que se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada; y el no supervisado, donde la salida representa el grado de familiaridad o similitud entre la información que se le está presentando a la entrada y la información que se ha mostrado hasta ese entonces. Está constituido por un conjunto de reglas que dan a la red la habilidad de aprender asociaciones entre los patrones que ocurren en conjunto (Alpaydin, et al., 2010).

5.1. Método de agrupamiento por Mixturas de Gaussianas

El método de mixturas de Gaussianas organiza los datos de forma jerárquica, requiere la selección de parámetros para la clasificación y es necesario que se tenga gran conocimiento en el objetivo de la clasificación para interpretar los resultados. En este caso, se realizaron algunas pruebas con los parámetros: media y covarianza, seleccionados mediante la variación de valores iniciales obtenidos mediante una técnica de tipo aleatorio. Por otra parte, la elección del número de grupos requiere que se haga varias pruebas con el fin de seleccionar la mejor solución. Para este método se tiene que los mejores resultados se obtuvieron con 14 clusters como se muestra en la Figura 2.

Aquí, resulta interesante analizar casos como el del municipio de Sapuyes, el cual es clasificado en el mismo cluster que los municipios de Leiva y El Rosario (Cluster 4). En este caso los índices socio-económicos tienen una fuerte influencia en la selección puesto que comparten una importante similitud en ese aspecto. Sin embargo, en materia de condiciones de demanda de energía eléctrica, se puede establecer que la clasificación realizada puede mejorarse.

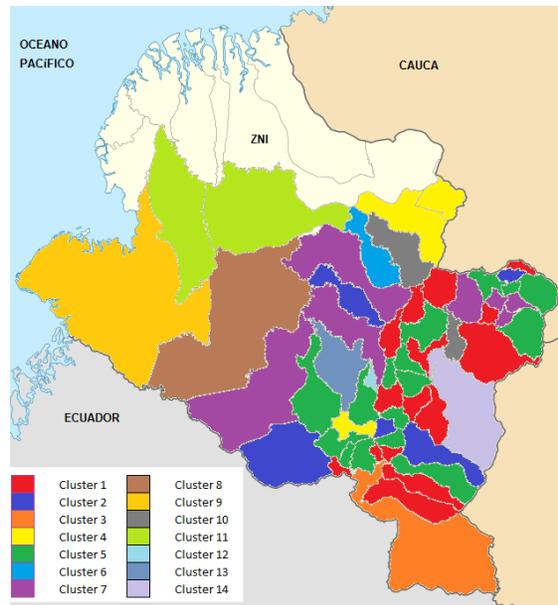


Figura 1. Clasificación de los municipios de Nariño mediante *Gaussian Mixture Clustering*.

5.2. K-Means Clustering

La clasificación realizada con este algoritmo, para el caso de esta investigación, presenta resultados bastante interesantes, lo que demuestra que para el tipo de datos con que se cuenta, los métodos de Particionado y Recolocación funcionan mejor que aquellos que realizan una clasificación jerárquica. El mapa de Nariño con la clasificación realizada por el algoritmo de agrupamiento k-means en ocho clusters es presentado en la Figura 3.

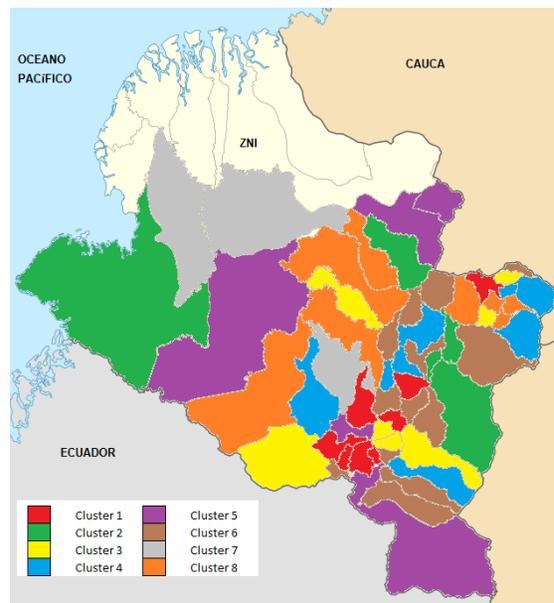


Figura 2. Clasificación de los municipios de Nariño mediante k-means Clustering.

Al igual que con el algoritmo de *Mixturas de Gaussianas* aquí observamos algunos

casos en que la clasificación realizada no es enteramente satisfactoria para los objetivos con los que se realiza. Citamos el cluster 6, en el cual se agrupan los municipios de Buesaco, Potosí, Córdoba y algunos otros. La revisión de las características de éstos municipios indica grandes brechas en varias materias como los de producción agropecuaria entre ellos, una vez más los índices socio-económicos juegan un papel determinante para la clasificación que aquí se alcanzó.

5.3. Redes Neuronales Artificiales RNA

Dentro del área de las RNA, existen diferentes métodos para realizar el proceso de clasificación, uno de los más utilizados por su buen desempeño y sencillez es el de mapas de auto-organización (SOM por sus siglas en inglés). Este tipo de RNA cuenta con una capa y una o más neuronas organizadas en una red. Los SOM aprenden tanto la organización como la distribución de los vectores de entrada que están siendo entrenados. Las distancias entre neuronas son calculadas de acuerdo con algunas funciones específicas; en este caso se utiliza la más común de éstas: la función de distancia *link*, la cual es simplemente el número de enlaces o pasos que debe tomarse para alcanzar la neurona en consideración.

La clasificación obtenida con el método de RNA arroja los resultados con mayor cantidad de clusters, 18. Al analizar las características de los municipios ubicados en cada cluster, se observa casos muy interesantes, un ejemplo de esto es el que ocurre con San Juan de Pasto (cluster 18), este municipio comparte un gran número de particularidades que lo acercan al cluster en el que se encuentran Ipiales y Túquerres (cluster 14), por ejemplo. Sin embargo, su condición como capital del departamento y las implicaciones que esto tiene sobre sus índices socioeconómicos lo separan y ubican individualmente como un caso particular. La misma situación se presenta con Tumaco (cluster 7), el cual comparte varias características con las otras municipalidades de la zona de la Llanura del Pacífico, no obstante, su condición de puerto sobre el Pacífico y las rutas comerciales con que cuenta debido a su situación, lo asilan y marcan un comportamiento particular en las tendencias de demanda energética.

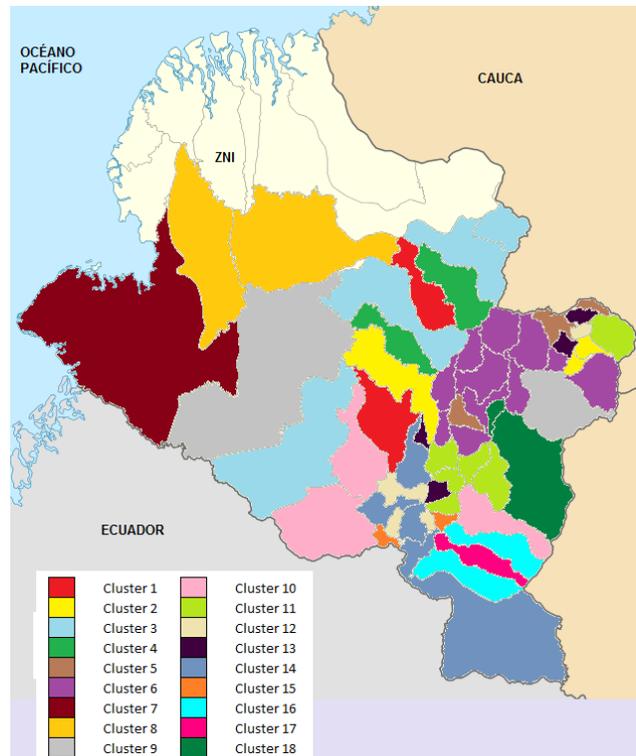


Figura 3. . Clasificación de los municipios de Nariño mediante RNA.

5. Conclusiones

La demanda de energía eléctrica es un campo de estudio bastante amplio y que ha sido abordado desde diferentes áreas del conocimiento. Al revisar la literatura, se hace notorio que para trabajar en este tema es necesario hacerlo desde un ángulo particular. La presente investigación se enfoca en las herramientas provistas por métodos de inteligencia artificial, pues son muchos los estudios que hablan sobre sus ventajas sobre otros métodos, los estadísticos (regresión, series de tiempo y/o econométricos) por ejemplo.

Un caso de estudio interesante que debe considerarse, no solo en el aspecto de demanda eléctrica; son los municipios ubicados en la Llanura del Pacífico, en muchos de los resultados de clasificación puede observarse la conformación de uno o más grupos en los que los municipios de la mencionada región son puestos en clusters marcadamente diferenciados del resto del departamento. Especialmente, es el caso de Magüi Payán y Roberto Payán. Para el caso de esta investigación, ésta situación puede presentarse por las condiciones de escasa infraestructura y lejanía entre las cabeceras que conforman la región, además de la escasa o inexistente malla vial sumado, a la situación de orden público por la que atraviesa esta zona del departamento.

Una limitante en el proceso de clasificación que afecta notoriamente los resultados obtenidos es la falta de información o la periodicidad en el muestreo con que es reportada. Organismos encargados de los estudios de demanda como la Unidad de

Planeación Minero Energética (UPME)⁴, cuentan con amplias bases de datos con las que generan modelos para los departamentos. En este caso, información como el PIB fue descartada debido a que no se cuenta con estudios desagregados para todos los municipios.

6. Agradecimientos

De gran ayuda para el desarrollo de esta investigación fueron los aportes del ingeniero Andrés Pantoja y la economista Ángela Castillo, también agradecemos de manera especial al proyecto "Análisis de Oportunidades Energéticas con Fuentes Alternativas en el Departamento de Nariño -ALTERNAR-"⁵, el aporte de este trabajo será de importancia para la siguiente etapa de dicho proyecto.

7. Referencias

Informes

- Castillo Burbano, Á. M., & Jurado, J. A. (2014). Caracterización social y económica del Departamento de Nariño. San Juan de Pasto: Plan de Energización Rural Sostenible del Departamento de Nariño PERSN.
- Rojas Zerpa, J. C. (2012). Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Achicanoy Martínez, W. (2014). Modelo de demanda de energía eléctrica para El Departamento de Nariño (enfoque univariado clásico). San Juan de Pasto: Plan de Energización Rural para el Departamento de Nariño (PERS-Nariño).
- Vilorio de la Hoz, J. (2007). Economía del Departamento de Nariño: Ruralidad y aislamiento geográfico. Documentos de trabajo sobre economía regional, 5-76.

Libros

- Alpaydin, E. (2010). Introduction to Machine Learning. London: The MIT Press.
- Arriaza, H. (2005). Metodología para la inclusión de variables sociales en la formulación, ejecución y administración de proyectos de energía rural. Quito: OLADE.

Memorias de Congresos

- Benavente, J. M., Galetovic, A., Sanhueza, R., & Serra, P. (2005). Estimando la demanda residencial por electricidad en Chile: El consumo es sensible al precio. Cuadernos de Economía, 42, 31-61.

⁴ <http://www1.upme.gov.co/>

⁵ <http://190.254.4.127:90/alternar/>

Fuentes electrónicas

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (7 de Abril de 2015). Estadísticas Sociales: Necesidades Básicas Insatisfechas. Obtenido de www.dane.gov.co
- Departamento de Ingeniería Electrónica - Universidad de Nariño. (2012). PERS Nariño. Recuperado el 02 de junio de 2015, de <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/>
- Departamento de Ingeniería Electrónica - Universidad de Nariño. (2015). ALTERNAR. Recuperado el 2 de junio de 2015, de <http://190.254.4.127:90/alternar/>
- Llanos, D., Azuaje, A., & Romero, I. M. (4 de Junio de 2013). Redes Neuronales. Obtenido de <http://redesneuronal.blogspot.com/ITESPRESSO>. (2014). Consultado el 20 de marzo de 2014 en <http://www.itespresso.es/electronica-consumo-2014-120015.html>.

Sobre los autores

- **Camilo Ernesto Pazmiño:** Estudiante de Ingeniería Electrónica Universidad de Nariño. Auxiliar de investigación proyecto ALTERNAR. camiloepazmino@hotmail.com
- **Gabriel Esteban Narváez Morales:** Estudiante de Ingeniería Electrónica Universidad de Nariño. Auxiliar de investigación proyecto ALTERNAR. gabriel-9110@hotmail.com
- **Wilson Olmedo Achicanoy Martínez:** Mg en Ingeniería Electrónica. Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Nariño. wilachic@udenar.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2015 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)