



ESTIMACIÓN EN TIEMPO REAL DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE DISPOSITIVOS EN HOGARES UTILIZANDO ARDUINO Y APLICACIONES WEB

Miguel Ángel Ortiz Padilla, Jimena De La Ossa Rivera, Juan Pablo Argumedo Espitia, Santiago Jaramillo Mira

**Universidad Pontificia Bolivariana
Montería, Colombia**

Resumen

En este trabajo, se presentan los resultados del diseño y construcción de un prototipo para la estimación del consumo de energía eléctrica en tiempo real de equipos en el hogar basado en Arduino, para la medición de las variables de voltaje y corriente, que usa Python para el cómputo de los datos de energía eléctrica consumida. Los registros se almacenaron en una base de datos PostgreSQL, los cuales son visualizados a través de una interfaz gráfica alojada en un servidor local desarrollada con Apache, PHP, CSS y JavaScript. Los resultados obtenidos muestran una buena aproximación del consumo de energía, consistente con los datos de placa de los equipos de prueba utilizados (computadores y neveras). A partir del trabajo realizado, se plantean modificaciones a los métodos de cálculo considerando el factor de potencia y valores RMS de la tensión y la corriente, así como la calibración de los sensores de corriente ACS712 y voltaje ZMPT101B con equipos de laboratorio como vatímetros y amperímetro para obtener valores más precisos. El dispositivo construido se presenta en esta etapa de alistamiento, como un prototipo para la detección rápida de consumo de energía en equipos usados en el hogar, susceptible de maduración tecnológica a partir de la adición de funcionalidades tales como: la transmisión de datos de forma inalámbrica, el perfeccionamiento de la interfaz gráfica de usuario y el almacenamiento remoto de los datos, ajustándose a la actual tendencia de dispositivos IoT (Internet of Things) conectados en todo tiempo y lugar.

Palabras clave: arduino; energía; potencia

Abstract

In this work, the results of the design and construction of a prototype for real time estimation of electrical consumption of home appliances based on Arduino for measuring voltage and current variables and Python for computing of energy data are presented. The records were stored in a PostgreSQL database, which are displayed on a graphical interface hosted on a local server developed with Apache, PHP, CSS and JavaScript. The results obtained show a good approximation of the energy consumption, which are consistent with the plate data of the equipment used for testing (computers and refrigerators). Based on the work carried out, modifications are proposed to the calculation methods considering the power factor and RMS values of the voltage and current, as well as the calibration of the ACS712 current and ZMPT101B voltage sensors with laboratory equipment such as wattmeters and ammeter. for more accurate values. The device built is presented at this stage of readiness as a prototype for the rapid detection of energy consumption in home appliances, susceptible to technological maturation such as the possibility of wireless data transmission, the improvement of the graphical interface. of user and remote data storage, adjusting to the current trend of IoT (Internet of Things) devices connected at all times and places.

Keywords: arduino; energy; power

1. Introducción

El consumo de energía eléctrica es una de las preocupaciones principales en los hogares debido a sus implicaciones económicas, medioambientales e impacto en la calidad de vida de las personas. Durante la emergencia sanitaria producida por la pandemia, la gestión de la energía ha obtenido mayor relevancia para las familias debido a que muchas de las actividades cotidianas se han trasladado a las viviendas (estudio, trabajo y entretenimiento), incrementando el consumo de energía en estas (NBER, 2020). Pese a que la demanda de energía eléctrica se redujo dramáticamente en el sector de servicios y la industria, hubo una leve compensación debido al incremento de su uso a nivel residencial (IEA, 2021). Esta situación ha planteado la necesidad de evaluar oportunidades de ahorro y estrategias para reducir el consumo, sobre todo en hogares donde la crisis afectó los ingresos.

En Colombia, la medición de energía eléctrica se realiza a través de equipos que deben cumplir con las normas establecidas en la Ley 142 de 1994, conocida también como ley de servicios públicos domiciliarios (Ministerio de Energía, 1994). La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) mediante resolución 070 de 1998 (Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica) también establece las principales características de los equipos de medida, principalmente las relacionadas con el acceso, registro, prueba, sellado y revisiones. Por su parte, los operadores de red y comercializadores de energía determinan los requisitos técnicos para la instalación de estos equipos basados en normas y reglamentos técnicos (NTC2050, RETIE), así como en estándares internacionales (IEC TC 13 - Electrical energy measurement and control) para garantizar la seguridad, calidad y eficiencia en la prestación del servicio. Comercialmente existen dispositivos para la medición de consumo y control de equipos, así como herramientas especializadas de diagnóstico y análisis que cuentan con las certificaciones de conformidad de producto expedidas



por entidades acreditadas por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia, ONAC (CENS, 2018). Sin embargo, el costo de adquisición de la mayoría de estos equipos es alto para las familias promedio y pueden requerir conocimiento especializado para interpretar los resultados. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un prototipo de bajo costo basado en Arduino para la medición de las variables de tensión y corriente, especialmente diseñado para realizar la estimación del consumo de energía en dispositivos eléctricos utilizados en el hogar, y su visualización en tiempo real a través de una aplicación web alojada en un servidor local desarrollada con Apache, PHP, CSS y JavaScript. Los cálculos realizados se hicieron con Python y los registros se almacenaron en una base de datos relacional PostgreSQL.

En la sección 2 de este documento se presenta el marco conceptual que fundamenta la realización del trabajo. En la sección 3 se hace referencia a los materiales y métodos utilizados, en donde se describen las diferentes fases de implementación del proyecto. En la sección 4 se muestran los resultados de la implementación del prototipo construido y en la sección 5 las conclusiones del trabajo.

2. Marco Conceptual

La electricidad es una de las formas más versátiles en las cuales se manifiesta la energía. Su generación, transporte y consumo controlado en aplicaciones tan variadas como iluminación, acondicionamiento de espacios y máquinas, así como su impacto en el desarrollo de las tecnologías modernas y las telecomunicaciones la han posicionado como uno de los servicios indispensables de la sociedad moderna debido a la mejora en la calidad de vida de las personas. La unidad con la que se mide comúnmente la energía eléctrica es el kilovatio-hora (kWh), definido como el trabajo realizado durante una hora por una máquina que tiene una potencia de un kilovatio (kW). Su equivalencia en Joules (J) de acuerdo con el sistema internacional de medidas es $1 kWh = 3.6 \times 10^6 J$. Los equipos empleados para la medición de la energía eléctrica relacionan la corriente y el voltaje, que permiten obtener la potencia y con este dato poder calcular la energía.

Entre los equipos utilizados comercialmente para la medición de energía se puede identificar dos categorías principales: los electromecánicos o de inducción y digitales. Los primeros, de uso más tradicional, se componen de bobinas, relojes de agujas y discos, y funcionan a partir de la interacción de campos magnéticos (LONDOÑO, 2013); los digitales, por su parte se han convertido en la tendencia actual y se caracterizan porque, aparte de la medición del consumo utilizando dispositivos electrónicos, muestran estos valores en una pantalla LED o LCD. En algunos medidores avanzados, las lecturas pueden ser transmitidas hacia áreas remotas, registrar la cantidad de energía de uso en horas pico y fuera de pico, y otros parámetros de suministro y carga como los voltajes, la potencia reactiva utilizada, la tasa instantánea de demanda de uso y factor de potencia (Vargas, 2016).

La preferencia por equipos de mayor precisión depende en gran medida del mercado en el que se encuentran los usuarios. El sector residencial pertenece al mercado regulado, en el cual la tarifa de energía se encuentra establecida por ley y contempla los costos de generación, transmisión, distribución, comercialización, pérdidas reconocidas y restricciones (pequeños consumidores), a



diferencia de los clientes no regulados que negocian la tarifa a través de la dinámica de oferta y demanda (grandes consumidores). En el caso de estos últimos, la gestión energética es un factor importante de la operación pues estos inciden en los costos de sus productos y servicios (CREG, 2004).

En este último escenario, los medidores inteligentes cobran importancia como elementos de monitoreo y control para la gestión energética. Estos, son dispositivos que realizan el cálculo del consumo de energía de una manera más detallada, y en los cuales el aspecto de comunicación de la información a través de una red juega un papel central (CIGEPI, 2016), siguiendo la tendencia de dispositivos conectados en todo tiempo y lugar, adquiriendo y enviando datos de los mismo a través de internet (Internet of Things, por sus siglas en inglés). Estos permiten la supervisión por parte del usuario, y la conexión y desconexión remota, entre otras aplicaciones. Un ejemplo de estos prototipos es AMI - Infraestructura de Medición Avanzada -, cuya arquitectura consta de: unidad de medida (medidor, visualizador, dispositivo de des/conexión), unidad concentrada (concentrador de datos), Sistema de Gestión y operación (Meter Data Management MDM), comunicaciones y seguridad (CIGEPI, 2016).

En el presente trabajo se utilizó el microcontrolador Arduino y lenguajes de programación como Python y JavaScript para desarrollar un prototipo de bajo costo con el cual realizar la medición y estimación en tiempo real del consumo de energía de equipos eléctricos en el hogar. La elección de la placa, sensores y lenguajes de programación utilizados se fundamentan en su facilidad de aprendizaje, acceso y documentación disponible.

3. Materiales y Métodos

Basados en el problema planteado se identificó que existe un incremento del consumo de energía eléctrica a nivel residencial originado por las medidas de confinamiento por el Covid-19. Adicionalmente dicho consumo afecta el estado de las instalaciones eléctrica, las condiciones de los equipos, influyendo en el incremento de las pérdidas cuando estos operan de manera ineficiente. Durante la etapa de consulta e indagación del problema, se encontró que la tendencia actual en mediciones de energía involucra tecnologías de adquisición y análisis de datos de forma remota, instalando instrumentos de medida en sitio para visualizarse a través de internet, siguiendo las tendencias de los dispositivos IoT. Como una forma de dar solución al problema planteado, en este trabajo se presentan resultados de la construcción de un prototipo de bajo costo para la medición de variables eléctricas a partir de las cuales se estima el consumo de energía de dispositivos electrónicos de las viviendas para ser visualizados a través de una aplicación web. Para el desarrollo del trabajo se consideraron limitaciones como el acceso a laboratorios e instrumentos de calibración (prototipo y ensayos realizados en casa), conceptos avanzados en el cálculo de variables en sistemas de potencia en corriente alterna (factor de potencia, fasores y transformadas), y conocimientos en desarrollo de software (servidores web, bases de datos e interfaz de usuarios).



3.1 Fases de Implementación

De acuerdo con la metodología planteada, el proyecto se dividió en 3 etapas: la primera etapa consistió en la construcción del prototipo de medición usando una placa Arduino para la adquisición de los datos de las variables eléctricas de voltaje y corriente a medir en el equipo; en la segunda etapa, se realizó el procesamiento de estos datos para el cálculo de la energía eléctrica consumida usando un código Python (aplicando expresiones matemáticas para hallar la energía). Cada dato fue almacenado en una base de datos diseñada en PostgreSQL; y en la tercera etapa se realizó la visualización de los datos a través de una aplicación web por medio de un servidor local, es de vital importancia mencionar que se realizó la calibración del dispositivo usando herramientas del mercado como multímetro, esta se realizó midiendo las variables eléctricas de corriente y voltaje con el multímetro y posteriormente comparándola con la mostrada por el dispositivo para luego realizar un promedio de los datos para ser ajustados. A continuación, se presentan detalles de cada etapa.

3.1.1 Medición de Parámetros Eléctricos

En esta etapa se realizó la construcción del prototipo con el objetivo de calcular la potencia eléctrica a partir de los parámetros de corriente y voltaje del equipo conectado. Esta medición se realiza por medio de sensores de medición como el sensor ACS712 y el sensor ZMPT101B, estos transmiten las señales a la placa Arduino para su posterior procesamiento y obtención del valor de la potencia instantánea. Para el proyecto actual, se utilizó la expresión básica de la potencia, la cual consiste en multiplicar la tensión por la corriente (en futuros trabajos se aplicarán los conceptos de factor de potencia para determinar la potencia activa real y los valores RMS de corriente y tensión).

$$P = V \times I$$

Los resultados de la operación son enviados por medio de la conexión serial a Python, suministrando las correspondientes instrucciones al programa de Arduino, el cual se basa en la lectura constante de las señales de entrada y su multiplicación. El dato de potencia obtenido es enviado a un programa de Python para proceder a la estimación del consumo de energía. En la Fig. 1 se muestra el prototipo construido para la medición de energía, y en la Fig. 2 se muestra la conexión de un equipo al prototipo para realizar las pruebas de medición.



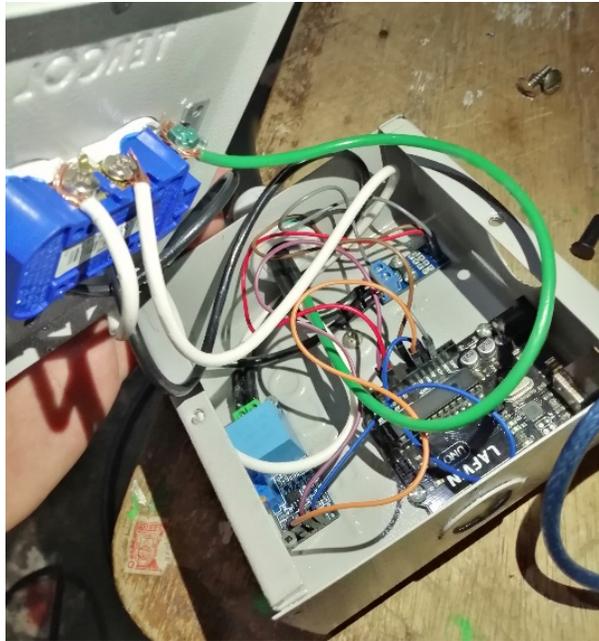


Fig. 1. Prototipo del Circuito Medidor de Energía



Fig. 2. Prototipo de Medición de Energía conectado a un equipo.



3.1.1.1 Componentes del Prototipo de Medición

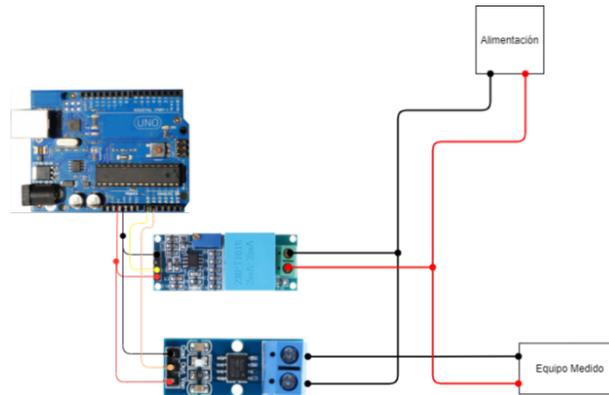


Fig. 3. Esquema de conexiones del prototipo.

Como se puede apreciar en la Fig. 3, el componente central es el microcontrolador de referencia Arduino UNO, el cual cumple la función de procesar los datos suministrados por los demás componentes y enviarlos al ordenador. Esta placa cuenta con pines para señales análogas y digitales. Los componentes utilizados para medir las variables eléctricas del circuito son: sensor de corriente ACS712, que permite la medición tanto de corriente alterna como continua que atraviesa un conductor y su conexión se realiza en serie con una de las fases del equipo bajo prueba, suministrando a su salida una señal de tensión proporcional al valor de la corriente medida; sensor de voltaje ZMPT101B se conecta en paralelo con el equipo y cuenta con un transformador para reducir el voltaje de entrada y permitir su escalamiento en el programa a partir de la calibración con equipo auxiliar como un multímetro.

3.1.2 Recolección, Tratamiento y Procesamiento de Variables Eléctricas

Una vez obtenido el valor de la potencia, se procede al cálculo de la energía. El programa diseñado calcula el promedio de tres valores consecutivos de potencia para obtener una potencia representativa durante el periodo de tiempo en el que fueron tomados estos valores y reducir el número de registros en la base de datos. La potencia utilizada para las estimaciones de energía se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$P_{promedio} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

Donde P_1 , P_2 y P_3 corresponden a valores consecutivos de potencia suministrados al programa por la tarjeta Arduino. Se estableció como criterio de registro guardar 10 datos por minuto, estimando un total de 14.400 datos por día de prueba (24 horas). En consecuencia, el delta de tiempo para el cálculo de la energía se fijó en 6 segundos, por lo que Arduino realiza las lecturas y cálculos de potencia instantánea cada 2 segundos. La ecuación para el cálculo de la potencia utilizado se muestra en la siguiente expresión:

$$\Delta E = P_{promedio} \times \Delta t = P_{promedio} \times \frac{6s}{3.600.000} [kWh]$$

Donde se ha incluido un factor de conversión para obtener los valores de energía en kWh , que es la unidad utilizada en las facturas del servicio de la energía eléctrica que llega a las viviendas y facilitará la comparación y análisis en los datos. Cada registro de energía es almacenado con un valor de potencia y una estampa de tiempo (fecha y hora) correspondiente al momento en el que



se realiza el cálculo de la energía. Para ello se realizó la conexión de Python con una base de datos relacional PostgreSQL

3.1.3 Visualización de Resultados

A partir de los registros almacenados en la base de datos se procede a su visualización a través de un servidor local. Para lograr este objetivo se utilizaron diferentes lenguajes de programación como PHP, HTML, CSS y JavaScript. A partir de un servidor web HTTP Apache se ejecutan archivos escritos en PHP para la página web, que también van a tener configuraciones en HTML y CSS para la estructura y diseño de la página y por medio de AJAX que es una extensión de JavaScript se mantendrá una conexión asíncronica y automática de la página web con la base de datos. Se definieron tres elementos principales para su visualización: una tabla con los registros de potencia, energía y estampa de tiempo; una gráfica de barras mostrando la energía consumida (total acumulado) por día; y una gráfica de dispersión que muestra la potencia instantánea cuando un equipo se encuentre conectado al prototipo.

4. Resultados

Se realizaron pruebas de medición a una nevera de 139 W, la cual fue conectada desde el 13 de junio de 2021 a las 2:00 PM hasta el 14 de junio de 2021 a las 2:00 PM (periodo de 24 horas). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4.



Fig. 4. Interfaz para la visualización de los resultados obtenidos en el servidor local (registros de la base de datos).

A partir de la gráfica de barras que se muestra en la Fig. 4 se puede observar que el consumo de energía del equipo conectado es cercano a 1,8 kWh para 24 horas de prueba (dividido en dos días consecutivos). Para el primer intervalo de medición (barra azul, correspondiente al 2021-06-



13 14:00 hasta 2021-06-13 23:59 – 10 horas) el consumo es menor que en el segundo (barra azul, correspondiente al 2021-06-14 00:00 hasta 2021-06-14 14:59 – 14 horas), sugiriendo un consumo constante el equipo, consistente con la naturaleza de su carga y datos técnicos. La gráfica de potencia instantánea aparece sin información una vez desconectado el equipo (se utiliza como indicador de carga conectada). En la tabla de registros se pueden explorar los datos almacenados en el servidor local.

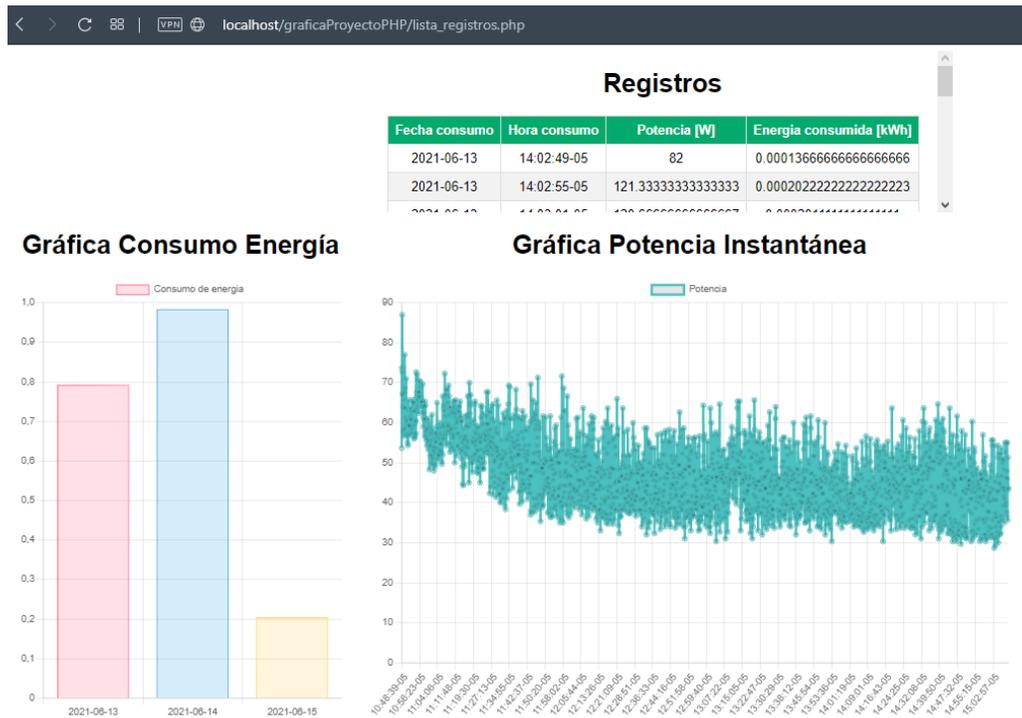


Fig. 5. Resultados en tiempo real de los datos adquiridos por el prototipo conectado a un equipo y visualizados en la interfaz. La gráfica de la izquierda es el consumo acumulado de energía, a la derecha se encuentra una gráfica de potencia instantánea contra tiempo y arriba una tabla rotulada como "Registros" que muestra los datos guardados en la base de datos en PostgreSQL.

En la Fig. 5 se muestran los resultados de una segunda prueba con equipo conectado (tiempo real) realizada el día 15 de junio del 2021. El equipo conectado en esta ocasión es un computador portátil, cuya potencia instantánea es menor en promedio a los registros de potencia de la nevera, los cuales permanecen almacenados en la base de datos.



5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se presentó y el diseño y construcción de un prototipo que permite visualizar el consumo de energía en tiempo real de un equipo de forma local, mostrando cómo evoluciona el consumo energético en función del tiempo utilizando una aplicación web creada a partir de programas escritos en PHP, HTML, CSS y JavaScript ejecutados en un servidor Apache. Se espera avanzar en el alistamiento del prototipo adaptándolo con otras funcionalidades como: envío de datos de forma inalámbrica a través de un módulo de Arduino; mejora de la interfaz gráfica de la página web y su presentación a través de un servidor remoto; cálculo de variables eléctricas como valores RMS, ángulos de fase y factor de potencia para determinar potencias activas y reactivas, con el fin de obtener una mejor aproximación al valor del consumo real; y calibración de sensores y pruebas comparativas con equipos de laboratorio como vatímetros y amperímetros.

6. Referencias

Fuentes electrónicas

- CENS. (enero de 2018). *CENTRALES ELÉCTRICAS DEL NORTE DE SANTANDER S.A. E.S.P.* Obtenido de SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ENERGÍA CNS-NT-06: <https://www.cens.com.co/Portals/0/normas-y-especificaciones/norma/CAPITULO%206/CAPITULO-6-Sistemas-de-Medicion-de-Energia-CNS-NT-06.pdf?ver=2020-11-12>
- CIGEPI. (Junio de 2016). Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial. Recuperado el 14 de Junio de 2021, de Medición y Gestión Inteligente de Consumo Eléctrico: https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/medicion_energia.pdf
- CREG. (2004). *Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Recuperado el 14 de Junio de 2021, de CÓMO SE DETERMINA EL VALOR DE LA FACTURA DE ENERGÍA ELÉCTRICA: https://www.creg.gov.co/sites/default/files/como_se_cobra_el_servicio_de_energia_electrica.pdf
- LONDOÑO, D. M. (Abril de 2013). *Repositorio academico de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Recuperado el 14 de Marzo de 2021, de Repositorio academico de la Universidad Tecnológica de Pereira: <https://core.ac.uk/reader/71397220>
- Ministerio de Energía. (11 de 7 de 1994). *Ley 142 de 1994*. Recuperado el 15 de 03 de 2021, de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/21435-3670.pdf>
- NBER. (12 de diciembre de 2020). *National Bureau of Economic Research*. Obtenido de Working from Home's Impact on Electricity Use in the Pandemic: <https://www.nber.org/digest-202012/working-homes-impact-electricity-use-pandemic>
- PrimeStone. (10 de Enero de 2020). *PrimeStone*. Obtenido de Diferencia entre medidores tradicionales e inteligentes: <https://primestone.com/diferencia-entre-medidores-tradicionales-e-inteligentes/>
- Vargas, R. J. (Mayo de 2016). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, Managua, Nicaragua*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, Managua, Nicaragua: <http://ribuni.uni.edu.ni/1174/1/80513.pdf>



Sobre los autores

- **De la Ossa, J.:** Estudiante de Ingeniería Electrónica. jimena.de@upb.edu.co
- **Argumedo, J.P.:** Estudiante de Ingeniería Electrónica. juan.argumedo@upb.edu.co
- **Jaramillo, S.** Estudiante de Ingeniería Electrónica. santiago.jaramillomi@upb.edu.co
- **Ortiz, M.A.:** Ingeniero Eléctrico, Máster en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Potencia y Energía. Docente de Cátedra. miguel.ortizp@upb.edu.co

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

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

