

Diseño de un prototipo a escala de seguimiento solar para mejorar la eficiencia de módulos fotovoltaicos en el municipio de Sincelejo

Carlos Andrés Mercado Montes¹
Sergio Antonio Sánchez Hernández²
Alex David Morales Acosta³

Resumen

Debido a la gran deficiencia energética que se presenta a nivel mundial, muchos países vienen haciendo un gran esfuerzo para suprimir los combustibles fósiles, no siendo la excepción Colombia, que tiene una ubicación geográfica estratégica para aprovechar el uso de este tipo de energía. Actualmente, se viene presentando una gran necesidad energética en el Caribe colombiano, experimentando suspensiones del fluido eléctrico, debido al deterioro de la red eléctrica, a las conexiones ilegales y al alto consumo de energía en esta región del país; presentando los costos energéticos más altos en esta región; partiendo de estas ideas se realizó el presente estudio, cuyo objetivo principal fue diseñar un prototipo a escala de seguimiento solar que mejore la eficiencia de los paneles solares, con el fin de escalar esta tecnología en el municipio de Sincelejo. El método utilizado se enmarcó en un enfoque cuantitativo, donde se trabajaron dos fases; un estudio descriptivo y un desarrollo tecnológico. Luego de someter a prueba el mismo con un estudio comparativo entre el prototipo y un dispositivo fotovoltaico estático de control, se determinó un aumento en eficiencia de 29,78 % en la captación energética por parte del sistema de seguimiento propuesto.

1 Ingeniero de petróleo, Corposucre, GINTEING. Correo: carlos_mercadom@corposucre.edu.co

2 Ingeniero Electrónico, Corposucre, GINTEING. Correo: sergio_sanchez@corposucre.edu.co

3 Ingeniero de Sistemas, Corposucre, GINTEING. Correo: alex_morales@corposucre.edu.co

Palabras claves: desarrollo tecnológico, energía solar fotovoltaica, eficiencia, tarjeta programable arduino.

Design of a scale prototype of solar tracking to improve the efficiency of photovoltaic modules in the municipality of Sincelejo

Abstract

Due to the great energy deficiency that occurs worldwide, many countries have been making a great effort to suppress fossil fuels, with the exception of Colombia, which has a strategic geographical location to take advantage of the use of this type of energy. Currently, there is a great need for energy in the Colombian Caribbean, presenting suspensions of the electric fluid due to the deterioration of the electricity grid, illegal connections and high energy consumption in this region of the country; presenting the highest energy costs in this region. The main research objective was to design a solar-scale prototype that improves the efficiency of solar panels, in order to scale this technology in the municipality of Sincelejo. The method used was framed in a quantitative approach, where two phases were worked on; a descriptive study and technological development. After testing it with a comparative study between the prototype and a static photovoltaic control device, an increase in efficiency of 29.78% in energy capture by the proposed monitoring system was determined.

Keywords: technological development, photovoltaic solar energy, efficiency, arduino programmable board.

Introducción

El Sol es una esfera de gas de la que emana una gran cantidad de luz y de calor. La vida sobre la Tierra depende estrechamente de la cantidad de radiaciones solares, es la estrella más grande que posee el sistema solar y emite una pluralidad de ondas electromagnéticas, esta energía se considera como radiación solar —varía entre los rayos ultravioleta lejanos hasta los rayos gamma—.

El Sol es un cuerpo negro cuya temperatura superficial es de 5500 °K, emite continuamente radiación a todo el espacio, irradiando aproximadamente 4×10^{26} W. Debido a ello, la energía solar radiada se distribuye de la siguiente forma: Gamma (1%), Ultra violeta (4%), Luminosa (49%) e Infrarroja (46%).

Las radiaciones gamma y las ultravioletas poseen un mayor nivel energético, debido a su baja longitud de onda, esta representa un 5% del total de la energía solar. La energía del espectro visible e infrarrojo representa un 95% del total —esta es la que se debe tener en cuenta para su aprovechamiento—. De la gran porción de energía que ingresa a la atmosfera solo el 51% alcanza la superficie de la tierra, debido a que un 4% se refleja en la superficie, un 20% se refleja en las nubes, un 6% se refleja en la atmosfera, y un 19% es absorbido por la atmosfera y las nubes. Las radiaciones que llegan a la tierra, pueden ser por el efecto albedo, directo o difuso.

Existen diferentes tipos de fuentes de energía; no renovables y renovables. Las no renovables son aquellas fuentes que se encuentran en la naturaleza en una cantidad limitada y una vez consumida en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe un sistema de producción o extracción, por ejemplo, los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y combustibles nucleares (uranio, plutonio, entre otros). Por otro lado, están las fuentes renovables, que son obtenidas de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales, por ejemplo; la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, undimotriz, biomasa, entre otras.

El Sol es una de las fuentes renovable virtualmente inagotables, por lo cual tiene múltiples uso y aplicaciones, dentro de la captación de la energía solar se pueden dividir en captadores térmicos pasivos, captadores térmicos activos y captadores fotovoltaicos. Es oportuno mencionar que, para el caso particular de esta investigación, se estará estudiando la eficiencia de los captadores fotovoltaicos.

Debido al alto deterioro de la capa de ozono, por el uso excesivo de los combustibles fósiles, muchos países a nivel mundial decidieron firmar el Acuerdo de París, dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece medidas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del calentamiento global; su aplicabilidad sería para el año 2020, cuando finaliza la vigencia del Protocolo de Kioto. El acuerdo fue negociado durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP 21) por los 195 países miembros, adoptado el 12 de diciembre de 2015 y abierto para firma el 22 de abril de 2016 para celebrar el Día de la Tierra.

A raíz de todos estos cambios climáticos, muchas naciones tienen como fuente principal de generación de energía las hidroeléctricas, las cuales depende directamente de los caudales de los recursos hídricos que tienen los países, que, a su vez, se ven afectados por las altas temperaturas, disminuyendo la cantidad de fluido por el principio de evaporación.

En este contexto, Colombia, no es la excepción. Actualmente, presenta una gran necesidad energética, al tiempo que experimenta suspensiones del fluido eléctrico debido al deterioro de la red eléctrica, a las conexiones ilegales y al alto consumo de energía en esta región del país; asimismo, presenta los costos energéticos más altos en esta región.

La necesidad de energía eléctrica es una constante en todas las sociedades contemporáneas, ya que la cotidianidad del ser humano, hoy día, depende en gran medida de dispositivos electrónicos que facilitan el desarrollo de sus actividades y tareas. Es por ello que la demanda mundial de la misma ha venido en aumento, pasando de un consumo per cápita de 1.199,372 Wh de energía en 1971 a 3.127,361 Wh en el 2014 (Agencia

Internacional de la Energía [AIE]), 2015). La demanda internacional de energía antes mencionada es abastecida en un 5,978% por las fuentes energéticas renovables, excluyendo las hidroeléctricas (AIE, 2015).

En Colombia, la producción eléctrica está sustentada principalmente por las centrales hidroeléctricas ubicadas en el centro y centro-oriente del país, abasteciendo energéticamente más del 80% de la demanda de los departamentos de las regiones Andina, Pacífica, y parte de la Orinoquia y del Amazonas; en el caso de las demás regiones y departamentos, son los combustibles fósiles los que satisfacen los requerimientos energéticos en su mayoría, mediante termoeléctricas; sean de gas o carbón y pequeñas estaciones generadoras a base de combustible ACPM, combustóleo o diésel (Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME, 2018).

El Caribe Colombiano es la zona del país que depende en gran medida de sus plantas termoeléctricas, las cuales generan energía a un coste superior al de las hidroeléctricas y que, por las condiciones climáticas de la zona, obliga a sus residentes a consumir mayores niveles de energía eléctrica, a fin de que sus hogares sean térmicamente agradables, ello conduce a que la facturación por consumo eléctrico sea alta en la mayoría de los hogares.

En los hogares de los estratos socio-económicos 1 y 2 de la costa, muchas veces no cuentan con los recursos necesarios para pagar el alto coste de su consumo energético, siendo estos los usuarios más morosos de todo el sistema con una deuda total entre ambos de 110 729 283 millones de pesos (Meza, 2018).

La energía solar fotovoltaica es por hoy una de las opciones más realistas hacia la seguridad energética sostenible que la humanidad tiene a futuro, ya que el Sol como fuente primaria de energía es un recurso de carácter cuasi infinito.

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2015) diariamente en promedio el Sol irradia 4,0 (o 1460 al año) a la Tierra, siendo este promedio mucho mayor en el Caribe colombiano, donde la irradiación solar va de 4,0 a 6,0 , condición que es muy favorable para el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos que contribuyan a reducir la dependencia de las fuentes energéticas fósiles no renovables (IDEAM, 2014).

Validando la irradiación solar del departamento de Sucre, específicamente en el municipio de Sincelejo, donde se realizaron las pruebas piloto del prototipo, se identificó una irradiación que oscila entre 4.5 y 5 KWh/m² en las horas sol más fuerte que van desde las 7:30 am a 5 pm, información suministrada por el *Atlas de radiación solar* del IDEAM, generando gran pertinencia el uso de este tipo de energía alternativa.

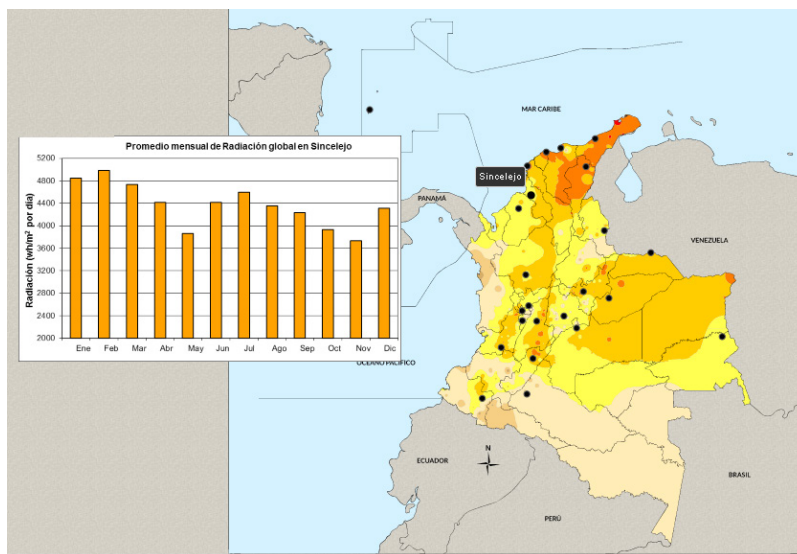


Figura 1. Mapa solar de Colombia, según atlas de radiación solar del IDEAM.

Mundialmente la energía solar fotovoltaica es la fuente renovable no hidráulica que genera más energía eléctrica, con una capacidad instalada de producción de 94 gigavatios (GW) a nivel mundial en el 2017; sin embargo, muchos de los sistemas fotovoltaicos actuales funcionan de forma estática, arreglo en el cual se disponen las fotoceldas en un ángulo que coincide con la latitud del sitio en donde se instalan y orientan norte-sur o sur-norte, en base al hemisferio de ubicación, lo que les permite aprovechar en gran medida la radiación solar en los periodos de mayor incidencia solar, que corresponde a las horas cercanas al cenit solar, pero en aquellas horas aledañas al crepúsculo del astro la radiación que estos reciben es mucho menor, por lo que se dejan de aprovechar aproximadamente 4 horas de generación solar fotovoltaica.

En base a las necesidades energéticas de las poblaciones más vulnerables de la costa Caribe colombiana, se planteó un prototipo de sistema de seguimiento solar que mejore la captación de energía en las celdas fotovoltaicas, y de esta forma lograr una optimización sobre los diseños convencionales, teniendo en cuenta que parte de la población referente habita en viviendas de interés social entregadas por el gobierno nacional en el Programa de Viviendas 100% Subsidiadas del Ministerio de Vivienda , gracias a la Ley 1537 del 20 de junio de 2012.

Los beneficiarios de este programa, por su condición socio-económica, perciben una mejoría en su calidad de vida, pero el pago de los servicios públicos (principalmente el de la electricidad) sigue siendo una carga económica que puede ser amortiguada con la aplicación de tecnologías eficientes de captación de la energía libre del planeta, como lo es la solar.

El estudio y aplicación de sistemas dinámicos fotovoltaicos no es un tema nuevo en el campo de la energía solar, sin embargo, la propuesta mostrada a continuación busca, mediante la programación en plataforma libre Arduino, presentar una alternativa que satisfaga las necesidades energéticas a bajo costo y alta eficiencia de estos prototipos en estas comunidades.

Energía solar en Colombia: así es el panorama en cifras

Colombia se define como potencia en generación de energía solar debido a su radiación. Con el Acuerdo para el Cambio Climático de París en 2015 quedó claro que el desarrollo económico del mundo debe moverse a partir de energías renovables, para dejar atrás la generación a partir de combustibles fósiles, como carbón, petróleo o gas natural.

En Colombia, el uso de la energía solar se ha convertido en una alternativa que cada vez tiene más adeptos, sobre todo para generar electricidad. La ubicación geográfica privilegiada para la irradiación energética, el desarrollo de nuevas tecnologías, el auge de nuevos mercados de energías renovables no convencionales y los beneficios tributarios de la Ley 1715 del 2014, han generado un entorno ideal para el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en este tipo de energía, que convierten al país en un referente de desarrollo de energías renovables.

Panel solar

Los paneles o módulos fotovoltaicos llamados comúnmente paneles solares —aunque esta denominación abarca además otros dispositivos— están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos mediante el efecto fotoeléctrico. Los paneles fotovoltaicos, en función del tipo de célula que los forman, se dividen en:

- Mono cristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los 4 lados cortos, si se puede apreciar en la imagen, se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada).
- Poli cristalina: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado

Tarjeta programable Arduino

Según la información consultada, la placa de desarrollo Arduino es un microcontrolador de hardware y software libre diseñado para favorecer un funcionamiento indispensable de la electrónica en diferentes proyecciones. Una de las particularidades de este, es que en el hardware reside en una placa con un pequeño controlador, el cual permite la interconexión con otros shields o módulos.

Hoy en día es muy utilizada en el mundo digital, ya que se hacen más fáciles los montajes de circuitos electrónicos. Sus aplicaciones se pueden encontrar en equipos biomédicos, aeronaves no tripuladas, impresoras 3D, entre otros (Kushner, 2011).

Metodología

La ciudad de Sincelejo ubicada a una latitud de $9^{\circ}17'58''N$ y una longitud de $75^{\circ}23'45''O$, fue el sitio seleccionado para realizar las pruebas del prototipo, debido a que esta ha sido el lugar de confluencia de muchas de las familias desplazadas del departamento de Sucre durante las épocas oscuras del conflicto armado, por lo que alberga una población desplazada

de 107 734 que corresponden al 39% de la población total del municipio, de acuerdo a la Unidad para la Atención y Reparación Integral de Víctimas (2015).

Además, es en esta ciudad donde se vio beneficiada parte de esta población víctima del conflicto armado a través del Proyecto de Vivienda 100% Subsidiada de Altos de la Sabana, junto con el Proyecto de vivienda de interés prioritario para ahorradores de la urbanización la Arboleda, ambos correspondientes a Viviendas de Interés Social (VIS) para familias de los estratos 1 y 2.

El desarrollo del prototipo a escala de seguimiento solar se basó en un desarrollo tecnológico tal como lo plantea COLCIENCIAS (2016), guiado por la necesidad de optimizar los sistemas de generación fotovoltaica, para su aplicación en las viviendas de interés social de comunidades vulnerables de la región Caribe, a fin de continuar mejorando sus condiciones de vida, al generar un alivio económico sobre uno de los servicios públicos de mayor carga económica, como lo es el de la energía eléctrica.

El desarrollo del dispositivo se fundamenta teóricamente en la capacidad de los sistemas fotovoltaicos de estructuras móviles de seguimiento solar (tracking), las cuales pueden ser hasta un 35% más eficiente que las estructuras fijas o estáticas. El mecanismo de este tipo de estructuras procuran una precisión de +/- 5 grados, que le permiten siempre tener una orientación cercana a la perpendicular del ángulo de elevación y orientación solar, por lo que los paneles fotovoltaicos operan con el mayor coeficiente de radiación solar sobre los mismos durante todo el día (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002).

Prueba de esto es el estudio teórico de la perpendicularidad de los rayos solares sobre un panel situado con un ángulo de 9° con orientación norte-sur, mediante una proyección de los ángulos de elevación en las diferentes posiciones (azimut) del tiempo solar sobre la ciudad de estudio, como se muestra en la figura 2.

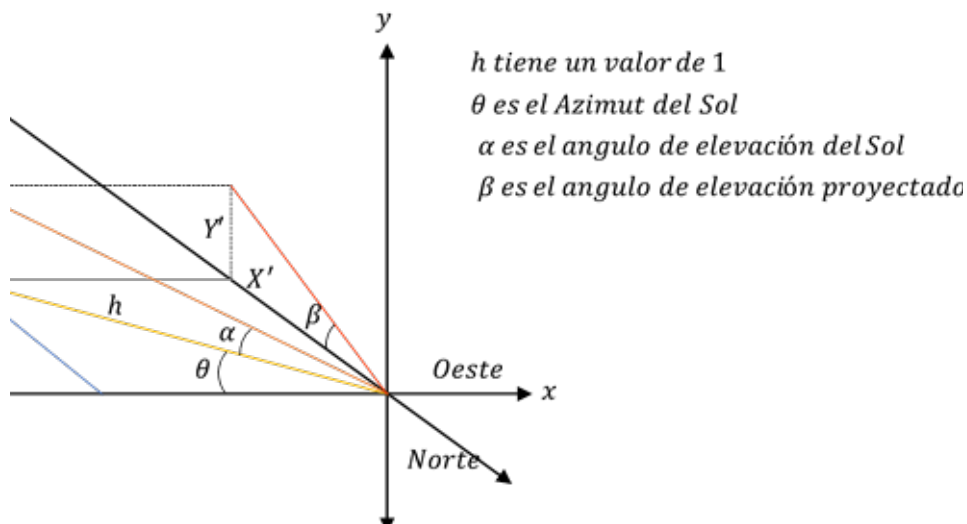


Figura 2. Esquema de para el cálculo del ángulo de elevación solar de una proyección perpendicular al panel solar estático.

Fuente: Elaboración propia.

$$\sin\theta = X/h, \text{ pero como } h=1 \rightarrow X = \sin\theta \quad (1)$$

$$\tan \alpha = \frac{Y}{h}, \text{ pero como } h = 1 \rightarrow Y = \tan \alpha \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{X'}{Y'}, \text{ pero como } X' = X \text{ y } Y' = Y \rightarrow \tan \beta = \frac{\sin \theta}{\tan \alpha} \text{ despejamos } \beta = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\tan \alpha} \quad (3)$$

Al realizar el análisis de perpendicularidad de la ecuación despejada con los datos de elevación solar y azimut del sol durante su tiempo solar sobre la ciudad de Sincelejo, se obtiene que desde el alba hasta las 7:30 los módulos fotovoltaicos estáticos reciben poca radiación solar, al igual que desde las 18:30 hasta el ocaso, como lo muestra en la Figura 3.



Figura 3. Elevación del sol en la proyección perpendicular al panel solar durante el tiempo solar de la ciudad de Sincelejo.

Fuente: Elaboración propia.

Otro detalle importante es que la perpendicularidad total para un panel dispuesto a 9° se da a una elevación de 81° , valor que nunca se alcanza, pero al cual se aproxima. Esto da a entender que durante los puntos muy cercanos a este valor el sistema opera a máxima eficiencia, y conforme este se aleje del mismo, la eficiencia en la captación de la radiación solar decaerá como se ve en la Figura 4, donde se hace un acercamiento a los ángulos de elevación en los cuales inicia la incidencia solar sobre el panel.

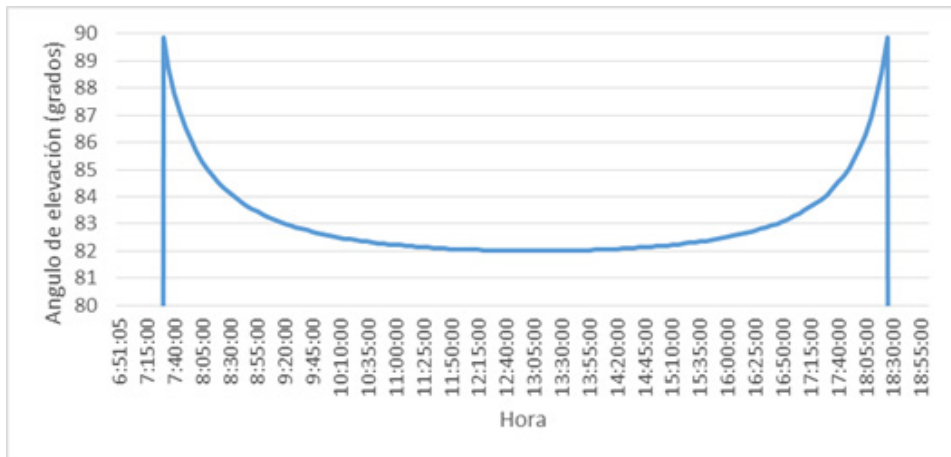


Figura 4. Acercamiento de la Figura 2 en el periodo de incidencia solar sobre el panel.

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo tecnológico se ejecutó en cuatro fases, iniciando con el levantamiento de información correspondiente al análisis teórico del ángulo de elevación y el azimut del Sol durante el tiempo solar promedio de la ciudad de Sincelejo, a fin de establecer los parámetros necesarios en la programación del dispositivo de seguimiento solar.

El diseño del dispositivo se realizó en base a un arreglo de cuatro celdas fotovoltaicas de 5 V y 175 mA conectadas en paralelo, montadas sobre una plataforma dinámica con inclinación de 9° ajustables para que el sistema de seguimiento siempre estuviese lo más perpendicular posible a la posición solar; dicho sistema fotovoltaico se compone de un módulo sensor de corriente ACS712 conectado a Arduino, un módulo cargador CN3065 para paneles solares, un banco de baterías de 6Ah en total y un conversor DC-DC.

El sistema de seguimiento solar se fabricó en un circuito aparte empleando la plataforma Arduino conectada a una fotorresistencia de control, responsable del iniciar el sistema cuando hay la radiación solar suficiente en el ambiente; dos fotorresistencias montadas sobre el módulo fotovoltaico para comparar los niveles de radiación entre el tope y la base de los mismos, y de esta forma hacer actuar al servomotor hasta que halle en el ángulo idóneo donde ambas medidas se encuentren en un rango aceptable; todo el sistema en general se detalla en la Figura 5.

Las pruebas del prototipo se desarrollaron en dos etapas, la primera corresponde a la verificación del funcionamiento del dispositivo, en la cual se realizaron varios ensayos a fin de que el sistema llevara a cabo un correcto seguimiento de la radiación solar; y un segundo conjunto de pruebas donde se buscaba determinar la eficiencia del dispositivo, las cuales se desarrollaron en la ciudad de Sincelejo en la semana del 10 al 16 de septiembre del 2018, tomando mediciones cada 30 minutos entre las horas de 6:30 y 18:00, y a través de la comparación de las medidas de energía generada en watts, por el prototipo (sistema dinámico) y un sistema estático con el mismo montaje fotovoltaico que sirve como control; este último con una inclinación de 9° y orientación norte-sur, mientras el del prototipo tiene la misma inclinación de los paneles pero con una orientación este-oeste, cuyo ángulo de elevación cambia conforme avanza el día solar.

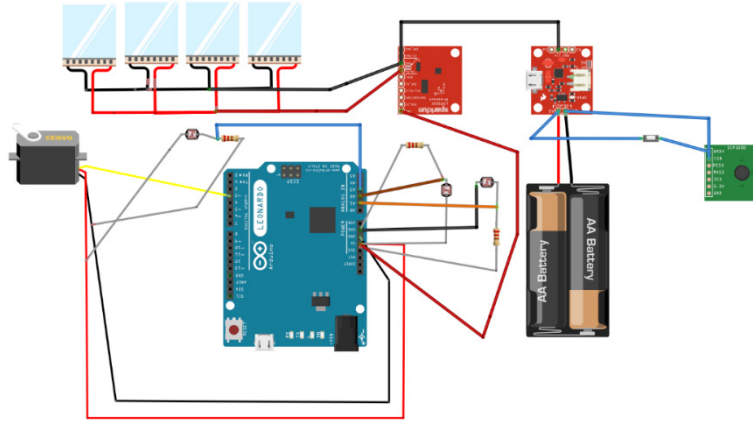


Figura 5. Esquema del prototipo de seguimiento solar en un solo eje.

Fuente: *Elaboración propia.*

Resultados

A partir de las pruebas desarrolladas entre el prototipo y el sistema de control durante la semana de estudio, se encontró que en algunas horas la incidencia solar no corresponde a los resultados esperados, ya que la climatología del área de estudio en dichas fechas afectó la data recolectada, sin embargo, esto no representó una gran diferencia en las mediciones del sistema, de las cuales se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 1.

Del análisis de los datos de generación energética de cada uno de los sistemas se puede constatar que las horas de mayor generación energética para los sistemas estáticos se halla entre las 9:30 y 16:00 horas, correspondiendo un tiempo solar efectivo de este tipo de sistemas, a diferencia del dispositivo con capacidad de seguimiento, el cual presenta altos valores de generación energética desde las 7:30 hasta las 17:00, constituyendo un mayor periodo de aprovechamiento solar.

Tabla 1

Resultados de las pruebas de eficiencia entre el prototipo y el dispositivo de control

Hora	Control (Watts)	Prototipo (Watts)
6:30	500	2050
7:00	750	2175
7:30	950	3400
8:00	1800	3450
8:30	2005	3500
9:00	2900	3400
9:30	3450	3500
10:00	3050	3250
10:30	2500	2550
11:00	3150	3150
11:30	2700	2700
12:00	600	600
12:30	2450	2450
13:00	3300	3300
13:30	950	950
14:00	3350	3350
14:30	3250	3250
15:00	3215	3250
15:30	3220	3400
16:00	3000	3500
16:30	2250	3400
17:00	1000	2950
17:30	800	2250
18:00	250	1800
Total	54.340	70.525

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma de estos resultados se puede estimar que el prototipo de seguimiento solar mejora en un 29,78% la eficiencia de captación energética de las celdas solares en comparación a los sistemas estáticos,

ya que el cambio del azimut del sol durante el día y la elevación del astro, limitan la captación energética de los sistemas estáticos, al contrario, el sistema de seguimiento no se ve confinado a estas variables.

En el análisis gráfico de los datos recolectados, se puede detallar como empieza a incidir la diferencia en la producción energética de ambos sistemas en las horas anteriores a las 11:00 y posteriores a las 14:30, con lo que se denota que los sistemas estáticos son altamente eficientes en un periodo aproximado de 4 horas en el área de estudio, muy cercanas al cenit solar, tal como se detalla en la Figura 6.

Con estos resultados se puede decir que los sistemas fotovoltaicos con mecanismo de seguimiento son una alternativa muy conveniente para el aprovechamiento de la energía solar en zonas con alta radiación, como lo es la región del Caribe colombiano, pero es necesario tener presente que este tipo de tecnología también depende de la velocidad de los vientos de la zona, ya que un panel dispuesto en ángulos muy elevados genera resistencia a esta fuerza de la naturaleza, constituyéndose como una amenaza a la integridad estructural del sistema.

Existen varias zonas de la región Caribe de Colombia, donde se experimentan fuertes corrientes de vientos, caso puntual, el departamento de la Guajira, donde su posición geográfica hace que experimente vientos de hasta 30 m/s, generando un alto riesgo en los soportes estructurales de los sistemas fotovoltaicos. En cambio, para el resto de la región dicho problema no es constante y solo se presenta cuando ocurren eventos climáticos de gran fuerza como tormentas y vendavales, fenómenos climáticos que vienen con una pérdida de la radiación solar, lo cual en el prototipo propuesto significa que el sistema se reinicie y ubique nuevamente los paneles en 0° , lo que sirve como mecanismo de protección en el dispositivo.

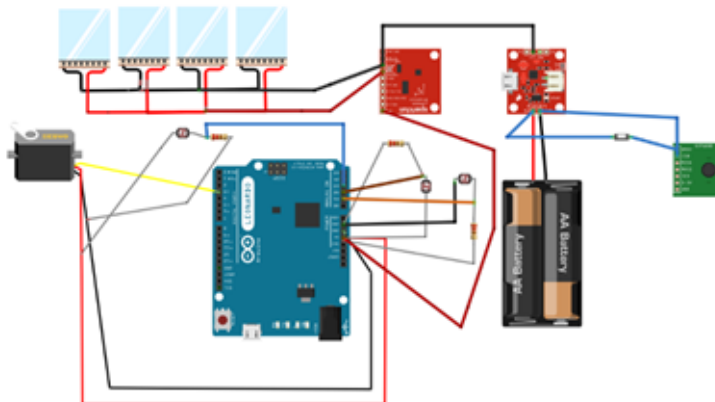


Figura 6. Relación de producción energética entre sistema fotovoltaico estático y prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de este prototipo se concibe como un paso hacia la investigación de alternativas de bajo costo y alta eficiencia energética que contribuya a solventar las necesidades de electricidad de una región tan dependiente de las fuentes fósiles como el Caribe y, en especial, de aquellas poblaciones vulnerables, de las cuales el gobierno nacional ha buscado mejorar sus condiciones de vida mediante iniciativas de vivienda social, pero en una zona donde el consumo energético es alto por la misma climatología, es importante que se sumen a estas iniciativas otras que ayuden a reducir su carga económica, como la que se desarrolló a partir de este proyecto.

Conclusiones

Una vez realizadas las dos fases correspondientes a esta investigación cuantitativa: un estudio descriptivo y un desarrollo tecnológico, se puede concluir que:

- La hora solar pico de la región Caribe es una de las más altas en todo el país, llegando a valores de 6 kW/m^2 , lo que la convierte en un gran prospecto de proyectos fotovoltaicos, con el propósito de suplir parte de las necesidades energéticas de la población colombiana que habita en esta.

- Una de las principales limitantes de los sistemas estáticos de energía fotovoltaica es el azimut del tiempo solar, pues este, al ir cambiando su posición a lo largo del día, solo es altamente eficiente en los periodos cercanos a su cenit, que para el municipio de Sincelejo está en el rango horario de entre las 10:30 y 15:00 horas; en cambio los sistemas de seguimiento tienen un rango de funcionamiento eficiente desde las 7:30 hasta las 17:00, 5 horas más que su contraparte.
- En el desarrollo de los sistemas de seguimiento solar basados en el uso de fotoceldas, es necesario aislarlas, para que solo reciban radiación solar desde arriba y no por los lados, ya que eso podría generar un error en la lectura real a fin de determinar la posición más perpendicular al sol.
- El prototipo de seguimiento solar en un solo eje demostró ser una alternativa de bajo costo y altamente eficiente de sistema fotovoltaico, al tener en las pruebas una eficiencia de 29,78% por encima del sistema convencional, por lo que es una opción viable en su implementación junto con proyectos de vivienda social, en aras de lograr un mayor impacto en la mejora de la calidad de vida de las poblaciones vulnerables de la región Caribe.
- La instalación de módulos fotovoltaicos sobre seguidores solares incrementa la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares, alcanzando mayor energía que los sistemas estáticos, que se ven afectados por el desplazamiento del sol durante el día.

Referencias

- Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2015). *Estadísticas de la AIE © OCDE/AIE*.
- COLCIENCIAS. (2016). Tipología de proyectos calificados como de carácter científico, tecnológico e innovación. Bogotá D.C.: COLCIENCIAS.
- Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación. (2002). *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación.
- IDEAM. (2014). Mapa de irradiación global horizontal medio diario anual de Colombia. Bogotá D.C.: IDEAM, Cartografía Básica IGAC.

- IDEAM. (2015). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Meza, M. (2018, agosto 20). La Costa, con la menor tarifa de energía, pero con el mayor consumo. *EL UNIVERSAL*.
- Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME. (2018). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano –Marzo de 2018*. Bogotá D.C.: Ministerior de Minas y Energía - MinMinas.
- Kushner, David (2011). Trabajando con arduino. *Revista IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino>
- Unidad para la atención y reparación integral de víctimas. (2015). *Informes regionales 2015. DT Sucre*. Bogotá D.C.: Unidad para la atención y reparación integral de víctimas.