

Desarrollo de un motor mendocino como herramienta de enseñanza en la aplicación de energías renovables y generación de alternativas energéticas¹

Development of a solar magnetic mendocino energy engine for studing for energy alternatives.

Cristian Mauricio Estupiñan²
Juan Pablo Puerto Reyes³
Mayra Alejandra Beltran⁴

Recibido: 23-07-2017 Aceptado: 31-07-2017

Resumen

Gracias al desarrollo de la célula fotovoltaica en 1953 pudo demostrarse que el aprovechamiento de la luz podía tener fines prácticos. Posteriormente Daryl Chaplin y Calvin Fuller, perfeccionan y plantean usos alternativos para las celdas solares. El Motor Mendocino fue uno de esos desarrollos experimentales en 1962; sin embargo su nombre se debe a Larry Spring, quien en 1994 en los Laboratorios de Mendocino Coast implementó un sistema brushless de levitación magnética para reducir la fricción del concepto. A pesar de que en la actualidad ha habido algunos avances académicos a nivel mundial, este campo requiere aun apropiación tecnológica por parte de los estudiantes en Bucaramanga y Colombia, de manera que sean conscientes del papel que tienen las energías alternativas para el futuro y como pueden plantearse diversos usos. La metodología general propuesta es la de formación por proyectos y STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics). El objetivo general de la Investigación es el de diseñar, construir, simular y prototipar un motor mendocino para estudio e investigación, utilizando el software de modelado virtual "solidworks" y la herramienta de impresión 3D Wanhao Duplicator i3. Esta investigación es de tipo descriptivo, buscando medir variables que inciden en el funcionamiento del motor por medio de plataforma hardware Arduino. Debido a la complejidad del proyecto, el equipo de investigadores se encuentra en fase de construcción del prototipo, con algunas

1 Este trabajo resulta de un trabajo de investigación realizado por el equipo de Tecnoacademia Nodo Bucaramanga.

2 Colombiano, Especialista en Gerencia de Proyectos. Ingeniero Mecánico. Facilitador de la línea de ingeniería para Tecnoacademia Nodo Bucaramanga. E-mail: cestupinanm@sena.edu.co

3 Colombiano, Estudiante de noveno grado del Instituto Politécnico de Bucaramanga y aprendiz de la línea de Ingeniería en Tecnoacademia Nodo Bucaramanga. E-mail: juanpablopuerto16@gmail.com

4 Colombiano, Administrador de Empresas, Líder de Tecnoacademia Nodo Bucaramanga. E-mail: mbeltrana@sena.edu.co

de las piezas impresas o adquiridas, logrando la levitación y estabilización del rotor, continuando el proyecto en fase de desarrollo.

Palabras clave: Motor, Mendocino, Energía, Alternativa, TecnoAcademia, Bucaramanga, SENA

Abstract

Thanks to photovoltaic cell development in 1953, it could be demonstrated that the use of light could have practical purposes. Later Calvin Fuller and Daryl Chaplin improved and proposed alternative uses for solar cells. The Mendocino Motor was one of those experimental issues in 1962. However, it was named by Larry Spring, who in 1994 at Mendocino Coast Labs implemented into his prototype a brushless maglev system to reduce friction of the concept. The engine became driven by sunlight and magnetic induction, using neodymium magnets located inside and outside the motor, equidistant locations from each other, in order to achieve magnetic force required to spin the rotor. Although there have been some scholars worldwide progress today, this field requires technological appropriation by students in Bucaramanga and Colombia, so that they get conscious about role that alternative energy for future, and how they can consider different uses for it. The general methodology is proposed projects and training by STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics). The overall objective of the research is to design, build, simulate and prototype engine one Mendocino study and research, using the virtual modeling software "solidworks" and 3D printing tool Wanhao Duplicator i3. This research is descriptive, seeking to measure variables affecting engine performance through hardware platform Arduino. Due to complexity of this project, the research team is on phase to build and improve the prototype, with some pieces already printed or acquired, achieving levitation and stabilization of the rotor, so this project is under development yet.

Keywords: Motor, Mendocino, TecnoAcademia, Bucaramanga, SENA

Introducción

El aprovechamiento de algo impalpable como la energía viene ocurriendo desde el comienzo de la historia humana. Pero al descubrir y explotar las fuentes convencionales no renovables, la ciencia ha venido explorando la posibilidad de utilizar fuentes renovables, de menor impacto ambiental y reguladas por ciclos naturales inagotables, como el viento, el agua, el calor y la luz. La exploración de este último recurso para la generación de electricidad inició entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con los trabajos de eminentes científicos como Becquerel, Hertz, Hallwachs, Planck y Einstein. Al último se le debe por supuesto la teoría final del efecto fotovoltaico publicada en 1905, la cual explica matemáticamente como se produce la emisión de electrones en una placa metálica a partir de su exposición a rayos de luz de alta frecuencia. (Einstein, 1905)

Gracias al desarrollo de la célula fotovoltaica moderna en 1953 a partir del silicio, patentada por Gerald Pearson de Laboratorios Bell, pudo demostrarse que el aprovechamiento de los haces de luz podía tener fines prácticos, diferentes al calentamiento de los materiales. Posteriormente Daryl Chaplin y Calvin Fuller, del mismo instituto, perfeccionaron y plantearon usos alternativos para las celdas solares (Salazar, Badii, Guillen, & Lugo, 2015).

Uno de estos consistió en un motor fotovoltaico, el cual fue un desarrollo experimental presentado por primera vez por Daryl Chaplin en 1962, como un motor autónomo y sin energía eléctrica directa; sin embargo se conoce actualmente como motor Mendocino en el ámbito académico. Su nombre se debe a Larry Spring, quien en 1994 en los Laboratorios de Mendocino Coast implementó un sistema brushless de levitación magnética para reducir la fricción de los elementos rotativos en el primer prototipo. El objetivo era el de comprobar que la luz solar podría usarse como una nueva fuente de energía limpia, utilizando elementos sólidos semiconductores para transformar la luz en energía eléctrica y mecánica. El concepto del motor pasó a ser accionado mediante luz solar

e inducción magnética, utilizando imanes de neodimio ubicados dentro y fuera del motor, en sitios equidistantes uno del otro, para lograr la fuerza magnética exacta en la rotación de dicho motor. Normalmente la configuración del motor Mendocino obedece a una figura prismática, utilizando de cuatro (perfil cuadrado) a seis (perfil hexagonal) paneles solares, para la obtención de la energía de alimentación que requiere producir el campo magnético. Hasta hoy son muchos los prototipos de motor mendocino que existen, ninguno para la generación comercial de energía, ya que con ellos se estudian conceptos teóricos en prácticas de laboratorio de física y electrónica. Sin embargo, tal desarrollo sería incomprensible si no se parte de la base de la celda solar como recurso de generación, y la importancia de su avance en la búsqueda por el cambio de nuestro modo de vida.

La energía proveniente del sol es transformada en energía eléctrica por medio de paneles solares compuestos de células fotovoltaicas. Debido a la distancia que separa al sol de la tierra (aproximadamente 149.6 millones de km) la energía que llega a la atmósfera del planeta es de 1,367 W/m², valor conocido como constante solar. Solo 198 W/m² logran atravesar la atmosfera, 50% como radiación directa y 50% como radiación difusa, aunque dependiendo del clima, las condiciones del terreno y la posición de la tierra del instrumento de medición, los registros pueden variar. La aplicación de la energía solar fotovoltaica a través de paneles solares ha venido incrementándose, aunque en esencia la tecnología sigue siendo la misma desde los años 50, a partir de cristales semiconductores de silicio con impurezas de boro y fósforo, cristales sensibles a la luz solar, los cuales emiten energía eléctrica DC por la excitación que reciben de la radiación, fenómeno conocido como efecto fotovoltaico. Actualmente se usan además del silicio otros materiales enriquecidos (Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio, germanio), y se experimentan diferentes configuraciones para aumentar la eficiencia y flexibilidad. Han sido muchos los factores para el fomento de este incremento, como la reducción del costo de fabricación y las políticas gubernamentales que fomentan el uso de energías alternativas, no solo la energía solar. Un módulo solar actual de 100

mm² puede producir de 2 a 4 A, a un voltaje de 0,46 a 0,48 V. La eficiencia actual de los paneles no sobrepasan el aprovechamiento del 5 al 30% de radiación directa, debido a que la el resto de energía se pierde por transmisión (atraviesa el panel) o por reflexión (rebota en el panel).

Por supuesto subyace la principal justificación, la cual se agrava con el transcurso de los años: la polución y los problemas de contaminación al medio ambiente causados por el uso indiscriminado de recursos naturales no renovables, como los combustibles fósiles, sumado a la crisis energética, los altos costos de manejo para las empresas generadoras de electricidad, y fenómenos naturales que afectan otras fuentes de energía en una cadena de sucesos producto de la dependencia de fuentes limitadas, por ejemplo el fenómeno cíclico del niño, y como tal fenómeno de manera caótica afectó el suministro y abastecimiento de energía eléctrica en nuestro país el presente año al afectar el recurso hídrico (Flórez, Gómez, & García, 2016).

Los países en vía de desarrollo, debido a su ubicación terrestre en la zona tropical, cuentan con el privilegio de recibir tasas constantes de radiación solar durante todo el año, sin embargo el potencial de este recurso solo se limita a la generación de electricidad en granjas solares de los países más desarrollados, en zonas estacionales, adaptaciones hogareñas a nivel mundial y programas espaciales. Para 2008 se generaron 5 GW a partir de energía fotovoltaica en nuestro planeta, pero esto fue tan solo el 0,375 % de la energía total generada, alrededor de 4000 GW, la cual ha venido creciendo en capacidad y demanda al igual que la población y las ciudades, incrementándose las inversiones, y a su vez el interés por investigar y desarrollar mejoras significativas en esta tecnología. Por supuesto el costo de una celda fotovoltaica es un elemento disuasivo en cualquier sociedad. En el año 2000, 15 g de silicio refinado generaban 1 W, mientras en 2009 dicha potencia se produjo con 5,6 g a un costo de \$ USD 1,4 por W. A medida que se incrementa su competitividad, la energía fotovoltaica en zonas con escaso suministro de agua y acceso limitado a redes convencionales eléctricas, está siendo más valorada como alternativa de consumo modular, por factores

como su instalación fácil y rápida, además del costo final de la estructura instalada; por ejemplo, comparando una hidroeléctrica que genera 2 GW cuya construcción tomaría 10 años o más, una planta fotovoltaica de la misma capacidad puede instalarse entre 1 a 2 años, aunque la vida útil de un panel solar esta entre el rango de 10 a 30 años, mientras el servicio de una hidroeléctrica puede ser mayor o igual 150 años (Swanson, 2009).

Para el caso de Colombia, a pesar de la ventaja estratégica de su posición geográfica sobre el Ecuador, el recurso solar ha sido poco explorado para la generación de redes de suministro y servicio eléctrico. Como país, el recurso de generación eléctrica descansa en las hidroeléctricas, con un 64% de participación en 2010, unos 8500 MW, y un 31 % en combustión de material fósil. Tan solo 6 MW se atribuyeron a fuentes fotovoltaicas, alrededor de 78,000 paneles solares instalados, en su mayoría en islas y zonas rurales. Teniendo en cuenta que la radiación media es de 4,5 KWh/m² debido a la variabilidad climática, la inversión estatal prospectiva presentará poco interés en la inversión pública de paneles fotovoltaicos, aunque la península de la guajira cuenta con una radiación media de 6 KWh/m², entre otras zonas alejadas, donde se vislumbran proyectos de generación de redes locales (Haubensak, 2011). Aunque con la última regulación, la Ley 1715 del 2014, se dictan diferentes incentivos para la integración del recurso solar con las redes convencionales, poco se ha avanzado en la materia. Esto se debe a que incluso a sabiendas del enorme potencial de la guajira, los costos de producción de energía solar fotovoltaica son superiores incluso a los de parque eólico, comparando el caso hipotético de plantas de producción de 12 MW suministrando energía al Sistema Interconectado Nacional, por lo que su viabilidad financiera aun es cuestionada (Buendía, 2014).

Afrontamos un reto como parte de la humanidad, un panorama claro, en el que en un futuro no muy lejano, los combustibles fósiles se agotarán. Es por ello que los jóvenes que se forman en las aulas del país deben familiarizarse con los diferentes conceptos de energías alternativas como las actualmente dispuestas y comerciales como lo son las fuentes solares:

paneles de silicio que capturan la intensidad lumínica y la transforman en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico; los colectores solares con la intensidad calórica del sol causan el efecto invernadero, aumentando la temperatura del ambiente controlado, utilizando elementos de transferencia de calor como serpentines o superficies aleteadas; la energía eólica como transformación del movimiento generado por las corrientes de viento a energía cinética generando diferencia de potencial eléctrico; fuentes las cuales utilizan celdas electroquímicas de combustible como el hidrogeno cuya obtención requiere altas cantidades de energía entre otras. Las nuevas alternativas energéticas requieren una apropiación tecnológica de los estudiantes de nuestras regiones, futuro de la mano de obra altamente calificada, la cual requiere aproximaciones teóricas y prácticas en el aprovechamiento y búsqueda de recursos renovables y su aprovechamiento creativo, además de los principios de diseño a los que cualquier diseñador o ingeniero se enfrenta a la hora de proponer una idea y materializarla. Todo esto parte de los principios del efecto fotoeléctrico y la electricidad. Normalmente estos principios físicos son abordados con rigurosidad durante el pregrado, asumiendo como complejos los fundamentos requeridos para que estudiantes de educación básica y media los puedan comprender. Sin embargo se ha demostrado que los proyectos de aula prácticos, manipulables y de observación directa, entre otros recursos pedagógicos, son mucho más efectivos para la asimilación de la información en los estudiantes, respecto a la memorización o exposición del concepto científico, además de su importancia en la concientización de la generación sostenible de energía (Pomar, 2014) (Aguirre, 2013). Los jóvenes tienen un gran reto, que es el de desarrollar esta metodología a través del conocimiento y el buen uso de los pasos que le llevarán a esclarecer sus dudas por pequeñas que les parezcan, convirtiéndose en el futuro en grandes científicos que aportarán beneficios a la humanidad y al planeta, generando seguidores con el tiempo, transformándose en una cadena, la cadena del conocimiento. (Bonilla, 2012)

El dispositivo propuesto como ejercicio de aula, el motor mendocino, motor solar o motor fotovoltaico, es un dispositivo que rota por medio

de energía solar e inducción magnética. Con la construcción de un modelo funcional o prototipo de motor mendocino se espera obtener una herramienta básica de estudio, investigación y optimización en TecnoAcademia Sena Nodo Bucaramanga, en la línea de Ingeniería, para el estudio de sus beneficios, servicios y/o utilidades como productor de energía eléctrica a partir de energía solar y mecánica, sus usos caseros o industriales y la búsqueda de nuevas alternativas energéticas, a través de métodos de diseño conceptual aplicando principios teóricos estudiados o consultados en bases de datos. Normalmente la estrategia de enseñanza de TecnoAcademia obedece al uso de módulos comerciales (Lego Mindstorm, VEX IQ, Little Bits, Dagabot, entre otros) los cuales presentan desventajas en su implementación tales como: uso de elementos estándares comerciales, generación de ideas limitadas a piezas prefabricadas, acceso limitado a los kits exclusivo de las instalaciones de formación y limitaciones en el lenguaje de programación. Vale la pena resaltar iniciativas educativas a partir de la generación de piezas propias, no recurriendo a la importación, como la implementada a nivel nacional por la Universidad Nacional de Colombia y su proyecto SMART (Sistema Multi-Agente Robótico para la Navegación Colaborativa) con estudiantes de grado 10° y 11° de la ciudad de Medellín (Jiménez, Ramírez, & González, 2011). Por supuesto esta necesidad de vencer la dependencia en kits modulares comerciales para que el estudiante conserve sus resultados, se percibe también a nivel internacional, con el Kit de levitación denominado MIT 6.302 Feedback Systems, propuesto por estudiantes de dicha universidad para propósitos pedagógicos con alumnos de bachillerato, demostrando que el aprendizaje adquirido a través del uso de diferentes herramientas de diseño, simulación, control y prototipado, para la creación de kits propios o la mejora de kits preestablecidos, mejoran de manera incremental el compromiso del estudiante, al punto de representar para este un reto el perfeccionamiento continuo de la práctica. Mientras el estudiante proponga tales mejoras se apropia del concepto teórico y comprende su rol como generador de soluciones prácticas (Lilienkamp & Lundberg, 2004).

La energía solar fotovoltaica asociada a la inducción magnética ofrece un rango amplio para la investigación, con el uso del motor Mendocino como fuente de energía de fácil acceso y herramienta de formación de aprendices investigadores en ciencia. Este proyecto educativo plantea no solo la búsqueda de nuevas alternativas de desarrollo en la región, sino la apropiación de estos temas por parte de nuestros estudiantes. Este proyecto busca mediante el diseño, construcción, simulación y control de las variables en un modelo funcional de Motor Mendocino, verificar la generación energética mediante la implementación de un banco didáctico de pruebas como ejercicio académico, verificando variables como: cantidad de luz incidente, número de vueltas, torque, y energía eléctrica producida. El objetivo principal del proyecto fue diseñar, construir, simular y prototipar un motor mendocino para estudio e investigación, el cual se encuentra en fase de desarrollo. El proceso de Tecnoacademia enfoca al aprendiz en formación por proyectos, en la línea de ingeniería se enfoca en las áreas de electrónica, robótica, diseño y prototipado; para el desarrollo del proyecto los fundamentos técnicos son complementados por las diferentes fases: El diseño del prototipo se realizó en el software Solidworks simulando el ensamble obteniendo valores de peso, tamaño de la estructura del prototipo; el prototipado se realiza mediante impresoras 3D, electrónica en la aplicación del embobinado basado en cálculos de del campo magnético generado.

Fundamento Teórico

La luz solar y el panel fotovoltaico

La luz es una onda electromagnética con diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta) que se desplaza por el espacio en toda dirección, cuya fuente más cercana es el astro conocido como Sol, tomando alrededor de 8 minutos para llegar hasta la tierra. Aunque su valor es constante en el espacio, debido a la interferencia atmosférica de la masa de aire y al ángulo de incidencia, la superficie terrestre recibe de 0 a 1000 W/m², radiación global que se divide en tres formas: directa (sin obstáculos), difusa (reflejada por nubes), y reflejada (rebota en

la superficie terrestre). Sin embargo los paneles fotovoltaicos presentan un componente más, y es su inclinación respecto a la horizontal, lo que puede mejorar su capacidad de potencia (por esto también se observan muchos trabajos académicos que buscan que el panel solar sea un seguidor y ajuste su parámetro de acuerdo al tiempo). El panel permite realizar una conversión eléctrica de los fotones incidentes en el espectro visible de la luz, logrando que los electrones del material cristalino se eleven a un estado mayor de energía y puedan transferirse a un circuito externo, retornando nuevamente al panel. Muchos materiales se han probado para la fabricación de células solares (Silicio, telurio de cadmio, diseleniuro de cobre en indio, arseniuro de galio, germanio y mezcla de cobre, indio, galio y selenio, variando la eficiencia desde 16% al 35%), todos con el funcionamiento común de ser materiales semiconductores de unión PN, comportándose como un diodo simple donde los electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción sin retornar, disipándose luego en el circuito debido a la resistencia del material conductor permitiendo el flujo de electrones. Por supuesto, entre menor es la incidencia de la luz, la resistencia aumenta y el efecto fotoeléctrico disminuye; sin embargo, los fotones presentan mucha más energía que la que requiere un electrón de valencia para moverse, por lo que el excedente se convierte en calor (Cata & Rodríguez, 2015).

Recurso solar en Bucaramanga

La luz solar es un según el atlas solar colombiano, en las zonas norte de Santander, donde se sitúa el municipio de Bucaramanga, la insolación solar promedio es de 3,5 a 4 KW/h/m², de comportamiento estable con picos más elevados en los meses de septiembre; de 4 a 5 horas diarias de brillo solar; 8 a 9 Irradiación Ultravioleta. (IDEAM-UPME, 2015). A pesar de la herramienta de consulta virtual del IDEAM, los datos específicos para Bucaramanga presentan pocas fuentes de consulta. Una de estas fue un estudio entre 2010 a 2012 adelantado por la Universidad industrial de Santander de los recursos renovables eólico y solar. Bucaramanga se encuentra a 7°8' latitud norte y 73°8' longitud oeste, con una temperatura diurna promedio de 26°C, precipitación anual

promedio de 1,279 mm, vientos promedio de 1,5 m/s. Según los datos de los investigadores, el recurso de insolación solar anual estuvo entre los 1180 a 1.700 kWh/m², cerca del 78% del recurso registrado en la guajira. En cuanto a la irradiación, el 87 % de los días son soleados y despejados, con promedio de 4,6 kWh/m² en rangos máximos y mínimos entre 0,9 a 11,3 kWh/m². Se estima relevante el uso de la energía fotovoltaica cuando los valores promedio son mayores a 3 kWh/m². Los investigadores concluyeron que la energía fotovoltaica podría ser de gran aprovechamiento, aunque las temperaturas máximas alcanzadas generarían pérdidas de entre 15 a 20 % de generación eléctrica; también, que el recurso eólico es insuficiente para Bucaramanga puesto que se requieren de velocidades de arranque mínimas de 2 m/s (Vergara, Rey, Osma, & Ordóñez, 2014).

Estado del arte de motores fotovoltaicos o mendocino

Los motores fotovoltaicos cuentan con diferentes configuraciones y morfologías, presentando ventajas competitivas para tareas repetitivas, en la industria espacial para la rotación de satélites, o por ejemplo de carácter agrícola, como el bombeo e irrigación de agua, requiriendo un motor entre 100 a 200 W de potencia, o para ventilación de invernaderos, requiriendo un motor de 50 W. Un motor fotovoltaico es un elemento que usa celdas solares y transmite la energía de la luz mediante un obturador para lograr convertirla en energía mecánica. El primer tipo es de configuración simple, utilizando un motor DC alimentado por los paneles directamente, sin embargo el motor requiere mantenimiento de acuerdo al tiempo operativo. El segundo tipo transforma la energía eléctrica DC de los paneles a AC con un convertidor, y utiliza un motor brushless AC, de mayor eficiencia y trazabilidad, aunque su costo, volumen y resistencia a la intemperie son aspectos negativos. El tercer tipo es una variación del anterior, solo que elimina el convertidor AC/DC mediante un obturador móvil para crear energía AC directamente con los paneles. Aunque más económica, esta variante depende del mecanismo para la obturación y sus limitaciones mecánicas. El esquema de funcionamiento obedece a una fase y

dos polos magnéticos donde se conecta un panel fotovoltaico y dos bobinas, lo que equivaldría a 2 dientes para el rotor y 2 para el estator. La repulsión o atracción genera movimiento en el rotor, el cual se mantiene por inercia. Sin embargo existen variaciones en la cantidad de fases, la naturaleza del rotor (si es ferrítico o magnético), el movimiento o fijación del magneto, el uso o no de obturadores para permitir el paso controlado de luz, incluso si los paneles y las bobinas se encuentran fijas en el estator o móviles en el rotor. Para fines prácticos se recomienda que el motor presente más de 3 fases y 2 polos magnéticos (Quéval, Vido, Coty, & Multon, 2015).

El motor mendocino es un elemento que generalmente se utiliza en laboratorios para enseñanza y su aplicación práctica se encuentra aún en estudio. Se caracteriza por el uso de figuras de sección prismática de caras construidas con paneles solares. Dentro de este espacio cerrado se encuentra una serie de bobinas, una por cada panel. Cada cara cuenta con una bobina conectada en un espacio opuesto. Cuando la fuente de luz excita al panel, causa en el circuito inducción magnética dentro y fuera de la bobina. La dirección del campo magnético al buscar alinearse de forma paralela o repelerse respecto al campo de un imán de neodimio, situado en la base fija del prisma, crea movimiento intermitente que se convierte en rotación. Es vital además tener en cuenta que el número de giros de la bobina fabricada en cobre puede aumentar el campo magnético, pero también aumentaría el peso y la resistencia, reduciendo la corriente. Depende por ende de la posición de la fuente de luz, que el motor gire con o contra las manecillas del reloj. Debido al bajo torque generado, se ha implementado soportes magnéticos en los extremos del eje para reducir la fricción, lo que empuja al eje en cierta dirección, por lo que debe situarse mediante contacto superficial contra un soporte vertical fijo, generalmente con un extremo puntiagudo (Novák & Hofreiter, 2012).

Aunque la implementación de esta tecnología data de mediados de la década anterior, existe poca literatura científica sobre el motor mendocino. Sin embargo, a continuación se presentan extractos de los resultados de las investigaciones más relevantes alojadas en diferentes bases de datos.

En la Republica Checa, la Czech Technical University en Praga ha realizado como parte de sus prácticas de laboratorio en control, un prototipo de motor mendocino de 6 caras y eje horizontal, el cual consta de materiales en acrílico y aluminio cortados en laser, paneles de silicio monocristalino de 0,5 V / 250 mAh de 65 x 20 mm, una unidad procesadora con un microcontrolador C8051F340, conectada a un PC para el registro en el software Matlab Simulink. Las bobinas se realizaron en cobre con núcleo de aluminio, aunque su forma fue imperfecta. Debido a la poca luminancia en esa parte del mundo, se instalaron dos fuentes de iluminación de lámparas halógenas de 12 V nominales y de 20 a 28 W de potencia, de encendido intermitente y potencia regulada mediante un Modulador de Pulsos, en direcciones opuestas focalizadas. La rotación era registrada mediante un encoder circular en franjas blancas-negras y un sensor montado sobre el eje rotativo. Esta información se visualizaba en una pantalla LCD para que el usuario verificara potencia de las lámparas y velocidad de rotación. Se logró con este prototipo velocidades entre 10 rps (600 rpm) a 25 rps (1500 rpm) con una lámpara de 20 W. Fue poco recomendable por los autores del estudio velocidades de 3-5 rps debido al desbalanceo producido por resonancia (Novák & Hofreiter, 2012).

En India, en la ciudad de Pune, se encuentra el G H Raison Institute Of Engineering & Technology. En este instituto se ha desarrollado también un motor mendocino prismático de base cuadrada. Al utilizar rodamientos magnéticos, se pretendía vencer la fuerza de gravedad, impedir el deslizamiento involuntario del sistema y reducir al mínimo la fricción producida por el movimiento rotativo. Sin embargo el desbalanceo es un factor que no se pudo corregir y aun se trabaja en ello. Se usaron 5 sets de magnetos, cuatro para los apoyos y un quinto para crear el campo magnético para el rotor, ubicado en la base y alejado del movimiento rotativo. Todos montados sobre placas traslucidas de acrílico. Estos rodamientos, de boro-acero-neodimio (NdFeB) de 10x12x5 mm, se montaron de manera que el campo apuntara hacia la misma dirección axial, por lo que el eje del rotor finaliza con un extremo ínfimo contra una pared de apoyo para contrarrestar los momentos

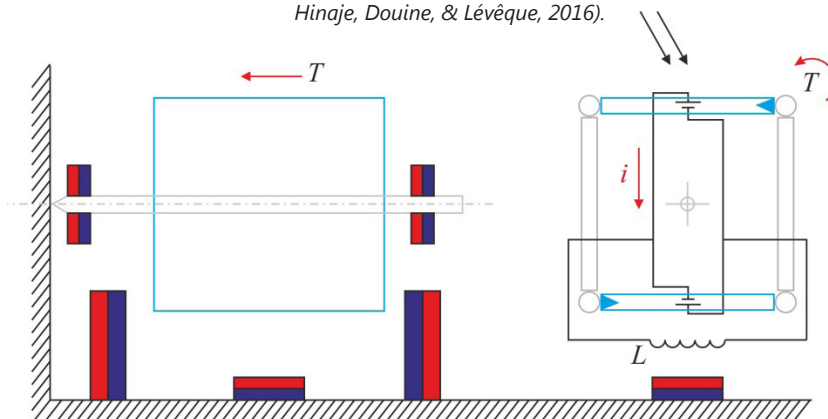
generados en un solo sentido. Cada set contiene 3 rodamientos, uno para el eje suspendido y dos de base, montados en configuración triangular, y distanciados entre sí por 5 mm; la desalineación o asimetría pueden ocasionar deflexiones en el eje y por tanto mayor inestabilidad. Dentro del bloque cuadrado se conectan en paralelo dos celdas solares, monocristalinas de silicio de 0,3 mm de espesor, 3V y 100 mA con dos embobinados, de forma que el campo dentro del rotor cambia de dirección a medida que es excitada una celda por el sol respecto a la otra que queda en la penumbra, logrando un movimiento uniforme, cuando interactúa con el campo del magneto ubicado bajo el rotor en la base; sin embargo la asegurar la continuidad era primordial por lo que se hicieron chequeos constantes. Por facilidad de construcción, los devanados se ubicaron en las aristas del prisma, actuando como contrapeso. Se demostró con un alambre calibre 33, con un devanado entre 35 a 40 Ω de resistencia, el motor producía una potencia máxima de 300mW en el máximo momento de luminosidad diurna, girando a 868 rpm con una carga de 50 g, suficiente para ventiladores sobre techo para refrigeración asistida en diferentes industrias (Rachcha, Gaikwad, & Dhopare, 2015).

Desde la Université de Lorraine en Francia, un sistema similar de motor mendocino de base cuadrada fue estudiado a partir de rodamientos superconductores enfriados con nitrógeno líquido para otorgarle al rotor la levitación. Estos

rodamientos son del material $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, de $30\varnothing \times 10$ mm, suspendidos por un imán de NdFeB de $27\varnothing \times 10$ mm, enfriado el primero con nitrógeno líquido a una temperatura de 77 °K (-196,15 °C). Para la construcción se usaron paneles solares de $120 \times 60 \times 2$ mm, logrando capacidades de carga axial de 1,5 Kg y radial de 0,2 Kg. Aunque se admite que este tipo de elemento tiene aplicaciones limitadas, sería posible usar este tipo de variante de motor mendocino para bombear líquido criogénico, aunque es poco lo que se ha investigado sobre el rendimiento de paneles solares a estas temperaturas extremas (Berger, Boufatah, Menana, Hinaje, Douine, & Lévêque, 2016).

Una de las dificultades más observadas es la medición de los valores que arroja el motor mendocino de cuatro caras. En la Universität Konstanz Fachbereich Physik de Alemania, se ha venido implementando diferentes instrumentos para las mediciones. Se conectó un conmutador para actuar como generador, de manera que la energía producida por la rotación pudiera medirse, y a su vez, el torque producido y el momento de inercia. Mediante un haz laser y un fotodiodo conectados con el software LabView, se pudo medir el número de revoluciones de rotor, la aceleración angular y la desviación del eje producto de la vibración, accionados los paneles con una lámpara halógena de 150W. El torque determinado respecto a las mediciones fue de $8,23 \times 10^{-5}$ kg*m², muy bajo para aplicaciones

Figura 1. Esquemas de funcionamiento de motor mendocino de perfil cuadrado. Vistas frontal y lateral. Cada panel solar se conecta con su opuesto en dos circuitos paralelos, cada uno de estos con su propio embobinado, ubicado en las aristas del prisma. A medida que incide la luz sobre un panel, la polaridad del embobinado cambia y el conjunto rota por acción del imán inferior. Los imanes también actúan como apoyo del rotor para anular la fricción, sin embargo agregan una dirección de torque axial, por lo que se requiere una pared para retener el eje. Fuente: Los autores. Modificado de (Kornher, Noebels, Roller, Schwieger, & Weller, 2011) y (Berger, Boufatah, Menana, Hinaje, Douine, & Lévêque, 2016).



prácticas (Kornher, Noebels, Roller, Schwieger, & Weller, 2011).

Otra versión del motor mendocino es el denominado motor fotovoltaico, desarrollado como ejercicio investigativo en la University of Cergy-Pontoise, de Francia. Se construyó un prototipo de motor de reluctancia conmutada con 5 fases con un rotor de acero de 4 dientes, interactuando con 6 dientes del estator donde se ubica el devanado. Los 12 paneles conformaban un prisma piramidal de base dodecaédrica, en el que gira el estator y un obturador en sentido vertical, de 33 cm de radio. Al contrario que el motor mendocino, los paneles solares y las bobinas son estáticos, y el obturador actúa como control de la entrada de la luz para el sentido de la dirección de giro. Asumiendo condiciones controladas de iluminación de 1000 W/m², un ambiente de 25 °C, una eficiencia de la celda fotovoltaica de silicio monocristalino de 18,8%, una eficiencia del motor de 80% sin carga, el motor giró a 98 rpm y pudo generar una potencia de 11,3 W, suficiente para aplicaciones de bombeo de agua e irrigación, aunque el torque producido fue difícil de medir (Quéval, Vido, Coty, & Multon, 2015).

Metodología

La metodología general fue la de formación por proyectos y STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics), implementada por el SENA para los proyectos de investigación e innovación de la estrategia TecnoAcademia a nivel nacional (SENA, 2016), basada en los siete pasos del método científico. Esta investigación es de tipo descriptivo, ya que se busca medir las variables que inciden en el funcionamiento del motor y comprobar su cambio en función del tiempo, la luminosidad y el control del viento incidente y la humedad relativa. Tales variables son "número de vueltas (Rpm), Torque (Nm) y energía producida (V), en función del tiempo, la luminosidad, y el control del viento incidente y la humedad relativa. A continuación se enumeran los pasos que se siguieron para el presente proyecto:

1. Identificación del problema: El motor Mendocino es un recurso poco explorado de

enseñanza que puede ofrecer oportunidades de formación a los aprendices de TecnoAcademia Nodo Bucaramanga, logrando un dispositivo replicable cuyos componentes puedan imprimirse.

2. Investigación acerca del problema: Búsqueda en fuentes indexadas del estado del arte relacionado con los motores fotovoltaicos, además de los fundamentos teóricos del efecto fotovoltaico y la importancia de este recurso en la generación de energía sostenible para Colombia y Santander.

3. Generación de posibles soluciones: A partir del anterior análisis se desprende la siguiente hipótesis ¿El Motor Mendocino puede ser usado como herramienta de enseñanza en la aplicación de energías renovables y generación de Energía? Existen diferentes configuraciones, en general dos: de eje vertical y eje horizontal, con prismas de diferente perfil, con número de paneles pares.

4. Escoger una solución: Se seleccionó para el prototipo una configuración de eje horizontal con un perfil prismático de 4 caras. Esta es la configuración más común observada en diferentes fuentes consultadas.

5. Desarrollarla y analizarla: Mediante software especializado y selección de componentes reciclados, se plantearon las piezas necesarias para la construcción del prototipo.

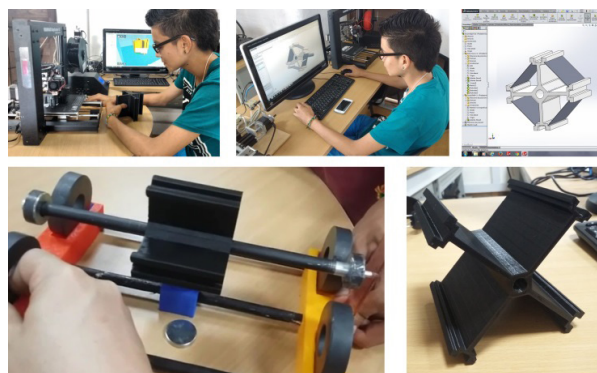
6. Construir el prototipo: Se construyó un primer prototipo, que luego se modificó y mejoró.

7. Probar y evaluar: Se logró la levitación del rotor cargado con el peso de los paneles y los embobinados de cobre calibre 24 y de 120 vueltas completas para un total de 480 para el rotor; calculando los voltajes generados en la configuración de circuito en paralelo de 1.8 voltios, generando mayor amperaje y hace que el rotor gire con la incidencia de luz directa de 4.5 Kw/m², observando en el proceso cada vez que aumenta o disminuye se genera movimiento de rotación de 10 rpm; se debe que el campo generado aún es insuficiente.

Materiales

El objetivo general de la Investigación fue el de diseñar, construir, simular y prototipar un motor mendocino para estudio e investigación, empezando el proyecto desde abril del presente año hasta la fecha, liderado por un aprendiz de la línea de ingeniería, quien aplicó los fundamentos aprendidos durante su formación. Se buscó primero diseñar las piezas virtuales en el software de modelado "SolidWorks" versión académica 2014 SP2.0 de la empresa Dassault Systemes. Para ello se contó con un computador portátil PC-Smart, con procesador Intel core i7-4710 MQ a 2,5 Ghz, 8 GB de RAM, y sistema operativo de 64 bits. Las piezas fueron prototipadas o adquiridas de máquinas recicladas. Para el Prototipado, se usaron las impresoras 3D Duplicator i3 y Duplicator S5 Mini de la marca Wanhao, de tecnología Fused Filament Fabrication (FFF), resolución de 0,02 mm y capacidad de impresión de 305x205x175 mm, provisto con el software Wanhao Maker 5.0. El material de impresión fue carrete de PLA (ácido poliláctico derivado del almidón de maíz) hilo

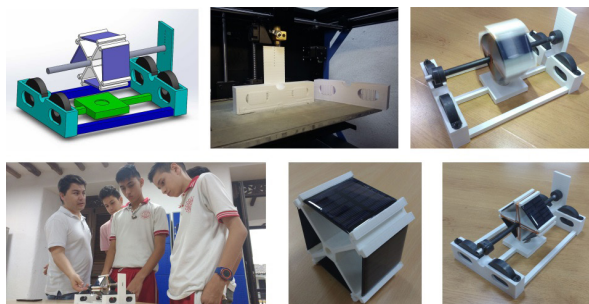
Figura 2. Aprendiz líder del proyecto y primer prototipo levitando. Dicho prototipo inicial requería de mucho esfuerzo para su alineación. Fuente: Los autores.



Fuente: Recopilado por el autor (2016)

de 1,75 mm de espesor. Las piezas adquiridas mediante reciclaje fueron: los imanes de cadmio, 4 para los apoyos de Ø57mm EXT y Ø 22mm INT, espesor 13mm; 4 para el rotor Ø22mm EXT y Ø13mm INT, espesor de 7 mm; y un imán central en la base de neodimio de Ø24mm espesor 5 mm. Para el rotor se utilizó un tubo de aluminio de Ø13mm espesor 0,5 mm y 210 mm de longitud;

Figura 3. Facilitador asesor del proyecto y segundo prototipo ensamblado. Aunque se logró corregir la estabilidad, la rotación presenta aun desbalanceo. Ante fuentes de iluminación continua sin presentar rotación, por lo que se presume debe aumentarse la cantidad de alambre para embobinado, lo cual incrementa el peso del rotor, el cual es actualmente de 158 gramos.



Fuente: Recopilado por el autor (2016)

para los embobinados se utilizó alambre de cobre No 32. Los paneles solares utilizados fueron de 55 x 55 mm espesor 3 mm, silicio monocristalino, 10 V 180 mA. Con el prototipo construido, se buscará implementar una fase de control con el módulo Arduino Mega 2560.

Resultados

A partir de las diferentes actividades se ha logrado prototipar el rotor del eje principal, propuesto como un prisma de 4 caras, con el fin de ensamblar los paneles solares y conducir las bobinas de alambre por las aristas del prisma. El prototipo logra estabilizarse durante rotación artificial, pero al momento de la presentación del presente documento, no se logró movimiento rotacional por incidencia de luz solar u artificial, por lo que la práctica de aula continúa para lograr la rotación y la medición de variables.

Conclusiones

Los resultados aunque fueron preliminares, y no se ha podido obtener mediciones, se entienden como positivos pues permiten al facilitador y sus

aprendices determinar los pasos a seguir para lograr un funcionamiento completo del prototipo. Una vez se logre este paso, y se conecte el sistema para generar medición de variables en tiempo real, podrá determinarse un protocolo de medición para luz natural y artificial, comparando los resultados. También se espera conectar el eje del rotor a un mini-generador adaptado, para transformar tal movimiento mecánico en energía eléctrica medible. Se recomienda la adquisición de un piranómetro para medir la irradiación solar en W/m², y la insolación en Wh/m²/día, necesario para determinar la eficiencia final, cociente entre la irradiación solar y la potencia generada; y determinar guías formativas e instrumentos para la medición del impacto del prototipo como recurso didáctico en el ambiente formativo.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, J. (2013). Las celdas solares como alternativa pedagógica en la enseñanza de la electricidad. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Berger, K., Boufatah, F., Menana, H., Hinaje, M., Douine, B., & Lévêque, J. (2016). Moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs. Symposium de Génie Electrique (SGE 2016): Electrotechnique du Futur (EF), Electronique de Puissance du Futur (EPF) et Matériaux pour le Génie Electrique (MGE). Grenoble, France: HAL.
- Buendía, A. (2014). Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energías renovables eólica y solar. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Cata, J., & Rodríguez, F. (2015). Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- EPM. (2010). Jepírachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana. Medellín: EPM.
- Flórez, M., Gómez, B., & Garcia, J. (2016). Análisis comparativo de diferentes esquemas de suficiencia en generación eléctrica: Algunas reflexiones para el mercado eléctrico en Colombia. Center for Research in Economics and Finance (CIEF), Working Papers(16-18), 1-33.
- Haubensak, O. (2011). Future prospects for renewable energy in Colombia. Energy Economics & Policy, 2-18.
- IDEAM-UPME. (27 de Octubre de 2015). Atlas Climatológico, Radiación y de Viento. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de Irradiación: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Jiménez, J., Ramírez, J., & González, J. (2011). Sistema modular de robótica colaborativa aplicado en educación. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia(58), 163-172.
- Kornher, T., Noebels, M., Roller, J., Schwieger, S., & Weller, F. (2011). Mendocino-Motor. Projektpraktikum. Konstanz, Alemania: Universität Konstanz.
- Lilienkamp, K., & Lundberg, K. (2004). Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design. American Control Conference (págs. 1-6). Danvers, USA: IEEE.
- Novák, Z., & Hofreiter, M. (2012). Mendocino motor and a different approaches to its control. MECHATRONIKA, 15th International Symposium (págs. 1-6). Prague, Czech Republic: IEEE.
- Pomar, C. (2014). La celda solar como módulo didáctico de enseñanza del efecto fotoeléctrico. Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias, 2(1), 1-17.
- Quéval, L., Vido, L., Coty, A., & Multon, B. (2015). Photovoltaic Motors Review, Comparison and Switched Reluctance Motor Prototype.

Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015 Tenth International Conference (págs. 1-8). Monte-Carlo, Monaco: IEEE.

Rachcha, T., Gaikwad, A., & Dhopare, N. (2015). Magnetically Levitated Solar Motor. Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015 2nd International Conference (págs. 233-240). New Delhi, India: IEEE.

Salazar, O., Badii, M., Guillen, A., & Lugo, O. (Abril de 2015). Historia y Uso de Energías Renovables. International Journal of Good Conscience, 10(1), 1-18.

SENA. (2016). Manual Línea Programática TecnoAcademia. Bogotá D.C: SENA.

Swanson, R. (15 de Mayo de 2009). Photovoltaics Power Up. Science, 324, 891-892.

Vergara, B., Rey, J., Osma, G., & Ordóñez, G. (2014). Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Rev.UIS.Ingenierías, 3(2), 49-57.