

Sistema De Automatización Para El Control De Las Condiciones Ambientales En Cultivo De Microalga *Chlorella*

Y.K. Beltrán-Cediel¹, A.M. Quiñones-García², J. Vargas³

Resumen— La ponencia presenta el desarrollo y la implementación de un prototipo electrónico e informático que permite el monitoreo y la supervisión de un cultivo de microalgas *Chlorella*, esto con el objetivo de potenciar su crecimiento y en consecuencia aprovechar sus propiedades de manera que se puedan convertir en una alternativa sostenible para dar solución a problemáticas de tipo social y ambiental. Con el fin de asegurar un ambiente propicio para su cultivo el sistema electrónico presenta la medición de las variables de luminosidad, densidad óptica y temperatura haciendo uso de tecnología de bajo costo. Además, se empleó hardware libre, el lenguaje de programación Processing, la implementación de los protocolos de comunicación 1-wire, I2C y sistemas de visualización virtual. La información recopilada por el sistema de instrumentación mediante los sensores se almacenó en archivos ASCII, estos permitieron un uso eficiente de memoria en los sistemas microcontrolados. Como resultado se obtuvo un sistema de monitoreo continuo en tiempo real y un control automático ante situaciones no paramétricas del cultivo, también se programó una interfaz gráfica de usuario para acceder en tiempo real a la información y el registro del proceso.

Palabras claves—Automatización, Interfaz gráfica de usuario, Microalgas, *Chlorella*, CO₂, control, instrumentación electrónica, Sistemas de control.

Abstract— The papers presents and development and implementation of a Electronic prototype and computer which allows monitoring and the supervision of a microalga *Chlorella* culture, this with the objective of enhancing their growth and consequently take advantage of its properties, so that they can become a sustainable alternative to solve problems of social and environmental type. In order to ensure an environment suitable for its culture the electronic system presents the measurement of the variables such as luminosity, optical density and temperature making use of technology of low cost. In addition, free hardware was used,

the programming language Processing, the implementation of 1-Wire communication protocols, I2C and virtual visualization systems. The information collected by the instrumentation system using the sensors was stored in ASCII files, these allowed an efficient use of memory in the microcontroller systems. As a result we obtained a continuous real-time monitoring system and automatic control in situations non-parametric methods of the culture, was also programme a graphical user interface to access in real time the information and the registration of the process.

Keywords— Automation, *Chlorella*, CO₂, control, control systems, electronic instrumentation, graphical user interface, microalga.

I. INTRODUCCIÓN

Las microalgas son un grupo unicelular que ofrece ventajas como alta eficiencia fotosintética, alta tasa de crecimiento y alta producción de biomasa comparada con otros cultivos energéticos [1]. Tienen la capacidad de crear y hacer fotosíntesis con diferentes fuentes de nutrientes como las sales minerales, en condiciones autotróficas y sustancias orgánicas (como estiércoles y aguas residuales), en condiciones mixotróficas, además, algunas microalgas pueden crecer en condiciones heterotróficas usando carbono orgánico en ausencia de luz, el CO₂ lo pueden obtener de gases de escape industriales, de la atmósfera o fijo en forma de carbonatos solubles, dicho esto, es de resaltar que las microalgas poseen una ventaja adicional que consiste en que pueden adaptarse a diferentes ecosistemas y procesos biotecnológicos [2].

Por otra parte, aun cuando el uso de los combustibles fósiles ha contribuido al desarrollo del mundo también se han convertido en el principal factor de deterioro del medio ambiente emitiendo gases que aumentan el efecto invernadero y en consecuencia el calentamiento global, siendo su papel tan importante, es momento de pensar en alternativas que puedan ayudar a reducir el daño que ya ha sido causado. Por ello, en los últimos años se ha empezado a investigar acerca de fuentes alternativas de energía (renovables), entre las que se encuentran las microalgas ya que presentan ventajas tales como un rendimiento de aceite mucho mayor que cualquier cultivo convencional, tienen una huella ecológica pequeña, se requiere una superficie muy reducida para cubrir la demanda actual de diésel de petróleo y son excelentes captadoras de CO₂ [3].

¹Yury Katherine Beltrán Cediel (katherinebeltran@ieee.org)

²Ángela María Quiñones García (angelaquinonesgarcia@ieee.org)

³Javier Andrés Vargas Guativa (javier.andres.vargas@unillanos.edu.co)
Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería,
Ingeniería Electrónica, Km 12 Vía Apiay Vereda Barcelona C.P. 1745.
Villavicencio, Meta, Colombia.

Dada su importancia y desempeño como generador de energía en condiciones adecuadas se habla de la producción de biocombustible como alternativa para solventar el efecto negativo en la actualidad.

Estos nacieron ante la necesidad de generar energías alternativas y poder sustituir el uso de combustibles fósiles [4] y además por las periódicas crisis del petróleo y el denominado efecto invernadero [5]. El uso de microalgas para la producción de biodiesel ha surgido como una opción promisoriosa sin embargo aún debe vencer retos como el costo de producción de biomasa, que involucra la optimización de medios, selección y manipulación de cepas y el diseño de fotobiorreactores [6].

Parte del objetivo del trabajo es evaluar la estrategia de adaptación y crecimiento en condiciones artificiales para mejorar la calidad y la eficiencia de la microalga *Chlorella* controlando los parámetros más incidentes y regulando una serie de variables seleccionadas en un sistema de instrumentación por medio de la adquisición de datos en un microcontrolador.

Las principales variables que se deben considerar en el cultivo de microalgas son luz, temperatura, pH, CO₂, agitación, densidad, nutrientes, zooplancton pastoreador y depredadores y oxígeno disuelto [7].

Los sensores nos permiten obtener información el estado de una variable o parámetro, los encontramos en todas las actividades de los seres humanos como son el control industrial de procesos, automóviles, aviones, dispositivos médicos, electrodomésticos, entre otros, formando parte esencial de nuestro bienestar [8]. En el desarrollo de este trabajo se usaron diferentes sensores que junto con un sistema de adquisición de datos permitieron extraer la información del entorno para su posterior procesamiento y análisis. El desarrollo de este tipo de tecnologías de bajo costo es importante para el mercado por su fácil accesibilidad económica y la funcionalidad y confiabilidad de tareas que fácilmente puede ser optimizadas [9]. Con el fin de minimizar costos en la generación de proyectos se puede acudir a software de código abierto, pues este permite obtener códigos fuente que se encuentran disponibles para que los programadores puedan verlo, leerlo, modificarlo y redistribuirlo sin las típicas restricciones de derecho de autor [10], de manera con las bases obtenidas en línea y las contribuciones individuales se puedan optimizar diferentes procesos.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

A. Características del medio de cultivo y selección de

los parámetros a medir.

El crecimiento de las microalgas está determinado por un balance adecuado de nutrientes y condiciones ambientales. Es preciso identificar las variables más importantes, su rango de valores óptimos y su interacción con los demás, ya que generalmente los niveles óptimos se definen en función de valores constantes u otros parámetros [11].

Las variables más importantes según la literatura consultada se lista a continuación:

1. Luz: el nivel de luminosidad es importante porque a través de la fotosíntesis se alcanza la máxima tasa de crecimiento específica para cada especie, si se sobrepasa ese punto se llega a la fotoinhibición que se puede resumir en resultados perjudiciales para la célula e incluso la muerte [12].
2. Temperatura: la producción algal aumenta proporcionalmente con la temperatura, si se sobrepasan las condiciones ideales aumenta la respiración y la fotorrespiración reduce la productividad, la temperatura óptima se encuentra entre 28° y 35°, su control depende de si es un sistema cerrado o abierto.
3. Nutrientes: el nitrógeno es el nutriente más importante (después del carbono) y se incorpora como nitrato (NO₃⁻) o como amonio (NH₄⁺). El fósforo es fundamental para procesos como formación de ácidos nucleicos y transformación de energía, su contenido en las microalgas es menor del 1%, pero su deficiencia limita el crecimiento [7].
4. Mezclado – aireación: incrementa la producción, incide principalmente en dos aspectos: incrementa la frecuencia de exposición de las células a la luz y favorece la transferencia de masa entre los nutrientes y la microalgas [12].

B. Diseño de los circuitos necesarios para la adquisición de los datos

Uno de los objetivos fue medir la densidad a partir del nivel de absorbancia de la microalga y así determinar su crecimiento, esto se logró por medio de un diodo infrarrojo como emisor y un fotodiodo opt101 como receptor, los circuitos fueron elaborados en las herramientas Multisim y Labcenter electronics .

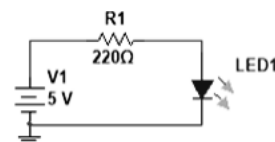


Figura 1. Conexión del diodo infrarrojo

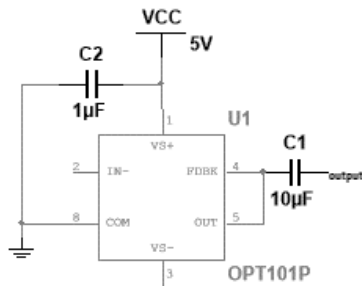


Figura 2. Conexión del fotodiodo opt101

Como se ha dicho la productividad aumenta proporcionalmente a la temperatura y ante el cambio climático es necesario asegurarse de mantener esta variable en un rango óptimo, por lo que se implementó un circuito que permitió al usuario conocer en cualquier momento la temperatura del cultivo. En la figura 3 se observan las conexiones necesarias para el funcionamiento del sensor digital DS18B20 de Dallas Semi Conductors.

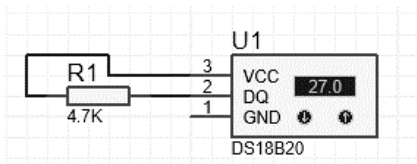


Figura 3. Conexión del sensor de temperatura DS18B20

No hay que descartar que existan temperaturas bajas ya que estas también pueden afectar el crecimiento, por tal razón se implementó un sistema de calefacción que constó de un bombillo de filamento incandescente, este es ideal dado que su eficacia para iluminar es muy baja, convirtiendo en luz visible en torno al 15% de la energía consumida y el resto se transforma en radiación ultravioleta e infrarroja [13], otorgando la calidez que sea necesaria al cultivo.

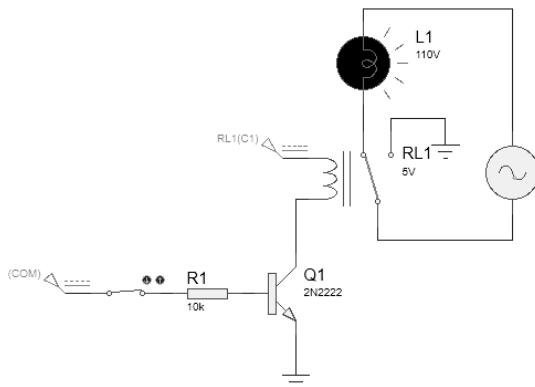


Figura 4. Circuito para el accionamiento de una tira de luz led

Es necesario supervisar y controlar la cantidad de luz que llega al cultivo de microalgas, para este propósito se usó el módulo BH1750, este es un sensor digital que permite medir la intensidad de luz, dispone de un conversor A/D de 16 bits, su unidad de medida es el lux y su rango de medida es de 0 a 65535lx (Cusi Vaca & Sánchez Morocho, 2016), su conexión se puede hacer directamente a un microcontrolador. En caso de que la luz que esté en contacto con el cultivo no sea suficiente, se añadirá una fuente de luz artificial proporcionada por una cinta LED, que será accionada con el circuito descrito en la figura 4.

Por último se necesitó un dispositivo que permitiera obtener de manera ordenada toda la información capturada por los sensores, se eligió para dicha tarea el microcontrolador Arduino, pues es de código abierto (open-source), está basado en hardware y software flexible y fácil de usar, permite afectar el entorno mediante el control de luces, motores y otros artefactos, los proyectos allí desarrollados se pueden comunicar con software en ejecución como Processing y además es de bajo costo [14].

C. Construcción del prototipo

El cultivo de la microalga chlorella se hizo con fines experimentales, se usaron los circuitos y sensores ya descritos y en cuanto al recipiente se empleó uno de vidrio. Antes de implementarlo se realizó un diseño en la herramienta SketchUp que permite crear modelados 3D, este programa es de uso gratuito, de fácil instalación y además cuenta con la posibilidad de publicar en Internet los archivos generados, de manera que cualquier persona pueda acceder a ellos [15].

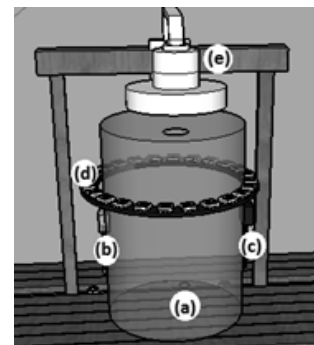


Figura 5. Diseño en 3D de la estructura, (a)recipiente, (b)diodo infrarrojo, (c)opt101, (d)cinta de leds, (e)lámpara.

D. Desarrollo de la interfaz gráfica

Cuando los datos son capturados y leídos por el microcontrolador Arduino solo pueden ser visualizados

mediante el monitor de puerto serie; esta interfaz es demasiado simple y está pensada para pruebas y experimentos de manera rápida, por ende es necesario trasladar los datos a otra plataforma que permita un diseño más amigable con el usuario.

La herramienta que se eligió fue Processing pues permite crear sistemas visualmente atractivos y tiene una rápida conexión con Arduino a través del puerto serial.



Figura 6. Interfaz, (a)presentación, (b)valores sensados, (c)instrucciones de uso, (d)condiciones ideales para el crecimiento de la chlorella, (e)fotografías

En la figura 6(c) se brindan algunas instrucciones al usuario para que esté en la capacidad de realizar las conexiones y poner en marcha el sistema, en 6(d) se hace una pequeña introducción al cultivo de microalgas para que una persona ajena al tema pueda interpretar la funcionalidad de cada variable sensada y en 6(e) se visualizan imágenes obtenidas en el desarrollo del presente trabajo. El proceso de adquisición de datos se realiza a través del microcontrolador Arduino y usando los protocolos de comunicación respectivos para cada sensor, evaluando por medio de processing la información a través del puerto serial visualizada en la interfaz 6(b).

En cuanto al tiempo de muestreo la temperatura y la luminosidad son sensados constantemente, mientras que la densidad óptica solo una vez por día y en horas de la noche para evitar interferencias con otras fuentes de luz.

III. RESULTADOS

El proceso para la creación del sistema de automatización para la microalga chlorella se llevó a cabo en un laboratorio con iluminación ambiental, el sensor de luminosidad permitió obtener curvas como la observada en la figura 7 donde se observa que entre las 6 y 19 horas del día hay una fuente natural de luz que llega al cultivo, con esto fue posible establecer la necesidad de activar fuentes externas de luz de manera automática, mejorando

las condiciones óptimas del cultivo las 24 horas del día.

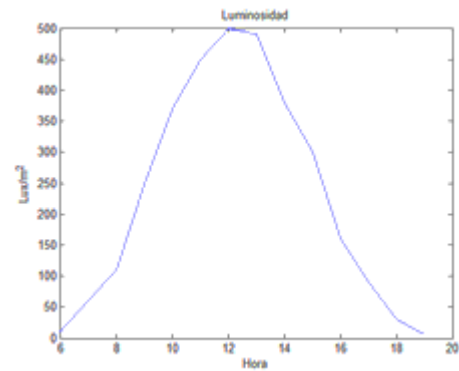


Figura 7. Curva del sensor de luminosidad

La temperatura se caracteriza por ser un parámetro muy constante, sin embargo, es necesario su supervisión pues el cambio climático extremo en ciertas horas puede alterar de manera negativa el crecimiento de las microalgas. A través del sensor DS18B20 se recopiló información durante 24 horas, resultado observado en la figura 8.

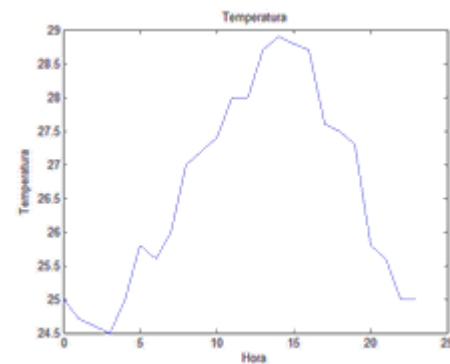


Figura 8. Curva del sensor de temperatura

La adición de un bombillo sobre la cubierta del sistema cerrado hizo parte del control como una herramienta para solventar temperaturas demasiado bajas dado que este transforma el 80% de su energía en calor, convirtiéndose en un medio eficiente y de bajo costo. Finalmente se tuvo una estimación de los valores de acuerdo a la ubicación adecuada de cada sensor para la medición de las condiciones de crecimiento del alga, el resultado final del prototipo se visualiza en las Figuras 9 y 10, con los sensores y un sistema de control básico pero eficiente para caracterizar la influencia de los resultados obtenidos en el experimento.

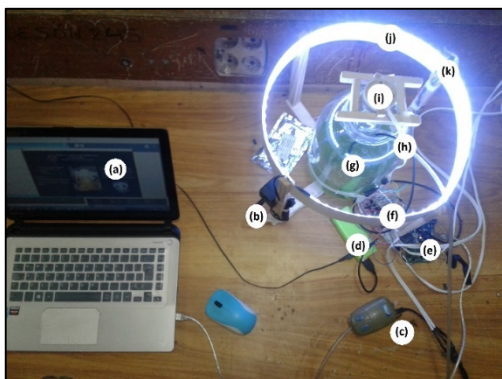


Figura 9. Diseño final del sistema de control e instrumentación (a)interfaz, (b)adaptador cinta de leds, (c)compresor, (d)batería de alimentación para el Arduino, (e)microcontrolador Arduino, (f) circuito, (g)recipiente, (h)sensor de temperatura y tubo del compresor, (i)bombillo incandescente, (j)cinta de leds, (k)sensor de lux

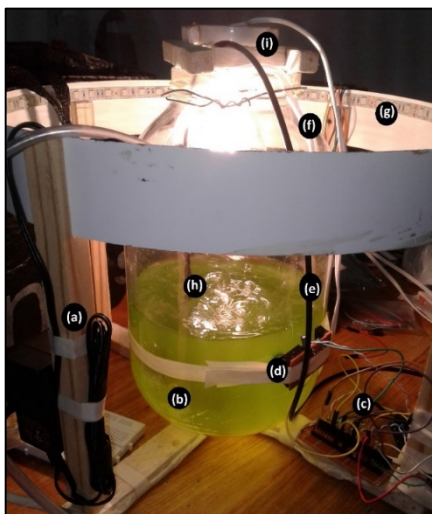


Figura 10. Diseño final, (a)adaptar de 12v, (b)chlorella, (c)circuito, (d)sensor opt101, (e)sensor de temperatura, (f)tubo del compresor, (g)cinta de leds, (h)diodo infrarrojo, (i)bombillo incandescente.

En general el sistema de control e instrumentación con algunas pequeñas modificaciones podría mantenerse para los diferentes tipos de cultivo (abierto o cerrado) y biorreactores, pues los parámetros que fueron supervisados son imprescindibles independientemente del método empleado.

IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La interactividad de la interfaz de visualización permitió monitorear los valores sensados y controlados en un ambiente cerrado de las microalgas.

La usabilidad de la interfaz permitió la activación y manipulación sin intervención física del usuario y

apropiando el uso de tecnologías de manera sencilla.

El control de parámetros (variables) sobre las microalgas se hace necesario, especialmente, para ambientes con valores extremos de temperatura y deficiencia de luz donde se requiere ejercer un control inmediato con el fin de garantizar la supervivencia de las microalgas.

Se suministró agitación con un compresor a la microalga para evitar que se sedimenten y permitir que todas las células reciban luz durante su crecimiento.

El estudio y trascendencia de los sistemas de control e instrumentación en microalgas tiene muchas aplicaciones en cuanto a solución de aguas contaminadas, residuales, extracción de aceite, uso en acuicultura, proteínas de consumo humano y parte de la dieta sana del consumo humano.

Existen otras variables importantes para mantener las condiciones adecuadas en el cultivo de microalgas, tales como: pH, salinidad, pureza del agua y oxígeno, variables que se puede abordar en un prototipo escalable que cuente con los instrumentos adecuados para la confiabilidad de los datos.

V. REFERENCIAS

- [1] Šoštarič, M.; Golob, J.; Bricelj, M.; Klinar, D.; Pivec, A. (2009) "Studies on the Growth of *Chlorella vulgaris* in Culture Media with Different Carbon Sources," *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 4, pp. 471-477.
- [2] Ortiz, M.; Cortés, C.; Sánchez, J.; Padilla, J. y Otero, A. (2012) "Evaluación del crecimiento de la microalga *Chlorella sorokiniana* en diferentes medios de cultivo en condiciones autotróficas y mixotróficas," *Orinoquia*, vol. 16, pp. 11-20.
- [3] Loera Quezada, M.M. y Olguín, E.J. (2010) "Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades," *Latinoam Biotecnol Amb Algal*, pp. 91-116.
- [4] Salinas Callejas, E. y Gasca Quezada, V. (2009) "Los biocombustibles," *El Cotidiano*, pp. 75-82.
- [5] Cortés Marín, E.; Suárez Mahecha, H. y Pardo Carrasco, S. (2009) "Biocombustibles y autosuficiencia energética," *Dyna*, pp. 101-110.
- [6] Fernández Linares, L.C.; Montiel Montoya, J.; Millán Oropeza, A. y Badillo Corona, J.A. (2012) "Producción de biocombustibles a partir de microalgas," *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, pp. 101-115.
- [7] Hernández Pérez, A. y Labbé, J.I. (2014) "Microalgas, cultivo y beneficios," *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, pp. 153-173.
- [8] Reverter, F. y Pallás Areny, R. (2005) *Direct Sensor to microcontroller Interface Circuits*, Barcelona, p.71.
- [9] Vargas, J.; López Velásquez, J.A. y Conde Cárdenas, L. (2014) "Sistema de Instrumentación y Control para Tanques de Almacenamiento de Agua Potable," *Revista Ingeniare*, pp.69-84.
- [10] Waring, T. y Maddocks, P. (2005) "Open Source Software implementation in the UK public sector: Evidence from the field and implications for the future," *International Journal of Information Management*, pp. 411-428.
- [11] Plasencia Álvarez, Juan. y Durán Altisent, J.M. (2012) "Cultivo de microalgas (*Chlorella Sorokiniana*) con iluminación mediante LEDs," *Pregrado, Dept. Producción Vegetal. Fitotecnia.*, Univ. Politécnica de Madrid.
- [12] Catalá Esteve, L. (2013) "Contribución al estudio del

crecimiento y las posibilidades del aprovechamiento termoquímico de las microalgas *nannochloropsis gaditana* y *nannochloropsis oculata*,” Ph.D, Instituto de Ingeniería de Procesos Químicos de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alicante.

- [13] Ortuño Sánchez, M.F.; Gallego Rico, S.; Márquez Ruiz, A.; Beléndez Vázquez, A. y Pascual Villalobos, I. (2016) “Iluminando con LEDs,” Revista Española de Física, pp. 9-12.
- [14] Azúa Barrón, M.; Vázquez Peña, M.A.; Arteaga Ramírez, R. y Hernández Saucedo, R. (2017) “Sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma arduino,” Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, pp. 1-12.
- [15] Gavino, S.; Fuertes, L. y Defranco, G. (2012) “Recursos Digitales para el Aprendizaje del Dibujo Tecnológico,” Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, pp. 60-65.

macrypt de la universidad de los Llanos, además ejecuta labores de docencia en la Universidad Cooperativa de Colombia, ha ocupado cargos en el Centro de Investigación, Docencia y Consultoría Administrativa, en el Instituto Insecept, Instituto Politécnico Agroindustrial, Electro Industrial del Meta, Instituto SYSPRO e Instituto Centro de Sistemas. Sus líneas de investigación son: investigación científica aplicada a la ingeniería civil, automatización industrial, instrumentación y sensorica, y TIC en educación.

Ing. Vargas, miembro de la rama IEEE, pertenece a Industry Applications Society. Recibió una Mención de servicios distinguidos por su identidad institucional categoría superior por parte del Centro de Investigación, Docencia y Consultoría Administrativa en el año 2013 y en el año 2006 recibió un reconocimiento por su desempeño docente por parte del Instituto SYSPRO.

VI. BIOGRAFÍA



Quiñones García Ángela María. Nacida en Chaparral, Tolima en Colombia, el 22 de julio de 1996. Es estudiante de noveno semestre de ingeniería Electrónica en la Universidad de los Llanos.

Ella actualmente labora como auxiliar docente de Ecuaciones Diferenciales y es estudiante investigadora del grupo de Estudio EYSI de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad de los llanos en Villavicencio, Meta Colombia. Es investigadora teniendo como temas de interés la Instrumentación Industrial, Automatización, y sistemas de potencia y energía.

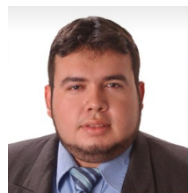
Est. Quiñones, miembro de la rama IEEE, pertenece a Industry Applications Society y Power and Energy Society.



Beltrán Cediel Yury Katherine. Nacida en Mariquita, Tolima Colombia, el 15 de mayo de 1996. Es estudiante de noveno semestre de ingeniería Electrónica en la Universidad de los Llanos.

Ella actualmente es estudiante investigadora del grupo de Estudio EYSI de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad de los llanos en Villavicencio, Meta Colombia. Sus temas de interés son automatización e instrumentación industrial y sistemas de potencia y energía.

Est. Beltrán, miembro de la rama IEEE, pertenece a Industry Applications Society y Power and Energy Society.



Vargas Guativa Javier Andrés. Nacido en Villavicencio, Meta Colombia, el 4 de octubre de 1983. Egresado de la Universidad de los Llanos como Ingeniero electrónico en el año 2007 en Villavicencio, Meta Colombia, Especialista en Mecatrónica Industrial de la Universidad Central en el año 2016 en Bogotá, Colombia, Especialista en pedagogía y docencia

universitaria de la Universidad la Gran Colombia en el año 2010 en Bogotá, Colombia, obtuvo su grado de Maestría en administración y planificación educativa de la Universidad Metropolitana de Educación Ciencia y Tecnología en el año 2012 en Panamá y actualmente es Candidato a Doctor en ciencias de la Educación en esta misma universidad.

El actualmente labora como profesor investigador del grupo