

INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Volumen 17 N° 1 Enero-Junio 2017

ISSN 1900-771X
E-ISSN 2422-4324



Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso- Boyacá, Colombia
Vol. 17 N°. 1 Enero-Junio 2017



Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo

Rector:

Alfonso López Díaz

Vicerrector Académico:

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento

Vicerrector de Investigación y Extensión (VIE):

Enrique Vera López

Decano Facultad:

Luis Alejandro Fonseca Páez

Director-Editor:

Oscar Iván Higuera Martínez

Asistente Editorial:

Olga Lucía Chaparro Barrera

Diseño:

Lorena María Alarcón Aranguren

Diagramación e Impresión:

Búhos Editores Ltda.

Correspondencia Canje y Suscripciones

a nombre de: Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo

UPTC Sogamoso-Boyacá, Colombia

Calle 4 Sur N° 15-134

Edificio Administrativo-Tercer Piso

Tel. (57+8) 770 5450 Ext. 2606

E-mail: revistaiid@uptc.edu.co

DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la publicación.

Categoría C Índice Bibliográfico Nacional Publindex – COLCIENCIAS

II Actualización del IBN- Publindex 2014

Comité Editorial y Científico

Ph.D. Pedro Fabian Cardenas Herrera

Universidad Nacional de Colombia

Ph.D. Gabriel Peña Rodriguez

Universidad Francisco de Paula Santander- Ufps

M. Sc. Andrés Fernando Jiménez López

Universidad de los Llanos

Ph.D. Jorge Julián Moreno Rubio

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Ph.D. Juan María Menéndez Aguado

Universidad de Oviedo

Comité de Arbitraje:

Ph.D. Alexander Pérez Ruiz

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

MSc. Francisco Javier Ibagüen Ocampo

Universidad del Quindío

MSc. Heiner Castro Gutiérrez

Universidad del Magdalena

MSc. Nelson Javier Escobar Mora

Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Luis Carlos Olmos Villalba

Institución Universitaria Pascual Bravo

PhD. Carlos Arturo Ávila

Universidad de los Andes

PhD. Jose Ignacio Marulanda Bernal

Universidad EAFIT

PhD. Jeison Marín Alfonso

Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Ramiro Alejandro Plazas Rosas

Universidad del Valle

Esp. Carlos Gabriel Correa Chaparro

Fundación Universidad de America

MSc. Christian Ricardo Zea Forero

Pontificia Universidad Javeriana

MSc. Andrés Fernando Jiménez López

Universidad de los Llanos

MSc. William Fernando Álvarez Castañeda

Universidad Santo Tomas

MSc. Oscar Oswaldo Rodriguez Díaz

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Andrea Catalina Alvarado Fajardo

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Edgar Absalón Torres Barahona

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Luis Ariel Mesa Mesa

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo

TABLA DE CONTENIDO

EDITORIAL

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ EN LA ATMÓSFERA DE RIOHACHA-LA GUAJIRA COLOMBIA

Chemical particulate matter PM₁₀ in the atmosphere of Riohacha - La Guajira Colombia

Carlos Doria Argumedo, Juan Reynerio Fagundo Castillo..... 5

CONTROL MULTIVARIABLE LINEAL CON DESACOPLES EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Linear multivariable control with decoupling in a heat exchanger

Jaime Freddy Ricardo Barrera, Edgar Barrios Urueña..... 17

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE INTENSIDAD LUMINOSA PARA UNA MÁQUINA DE INSOLACIÓN

Design of controller for a machine light intensity insolation

Javier Eduardo Martínez Baquero, Elías Parrado S., Luis E. Morales Suarez..... 26

COLOMBIA: TERRITORIO DE INVERSIÓN EN FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA RENOVABLE PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Colombia: Territory for investment in non-conventional renewable energy to electric generation

Wiston Ñustes, Sergio Rivera..... 37

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN OPERANDO BAJO CICLO COMBINADO

Exergy analysis of cogeneration plant operating under combined cycle

Hernán Darío Patiño Duque, Brayan Darío Rosero Coral..... 49

SISTEMA DE GESTIÓN ISO 9001-2015: TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA DE CALIDAD PARA SU IMPLEMENTACIÓN

Management system ISO 9001-2015: techniques and tools of quality engineering for the implementation

Fanny Liliana Cruz Medina, Andrea del Pilar López Díaz, Consuelo Ruiz Cardenas 59

DESERCIÓN ESTUDIANTIL EN COLOMBIA Y LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA DE LA UPTC SECCIONAL SOGAMOSO

Student dropout in Colombia and the engineering programs of the Uptc campus Sogamoso

Oscar Iván Higuera Martínez 70

CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO..... 77

EDITORIAL

La Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo (I²+D) de la Uptc, durante los últimos 10 años, se ha dedicado a la difusión de artículos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería. Gracias a los enormes esfuerzos de parte de sus editores, I²+D ha logrado ser reconocida y categorizada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS). De esta manera, la revista ha venido consolidándose como un excelente medio para compartir importantes resultados de investigación, tanto para autores nacionales como internacionales. Siendo para mí, un verdadero honor, haber sido invitado a redactar esta Editorial.

Por lo tanto, quisiera a través de este escrito, dar un especial reconocimiento al Ingeniero Oscar Iván Higuera, por el arduo trabajo realizado como actual Jefe Editorial de la revista; sin olvidar, por supuesto, a su predecesor el Ingeniero Oscar Oswaldo Rodríguez. Además, es para mí importante, agradecer el apoyo incondicional de su Asistente Editorial Olga Lucía Chaparro, y de María Lorena Alarcón, diseñadora gráfica de la revista. No puedo olvidar, por otra parte, reconocer el inmenso apoyo otorgado al presente número de nuestra revista, por parte del equipo de revisores, los cuales podemos consultar en la página legal de esta publicación. De manera muy sincera, reciban los más grandes agradecimientos.

Para este número, fueron arbitrados 20 artículos, de los cuales 7 fueron publicados, obteniéndose una tasa de aceptación del 35%. Esta publicación, abre con un interesante estudio que revela la composición química de las partículas atmosféricas, a través de técnicas de Espectrofotometría UV-VIS y Espectrometría de Masas en la ciudad de Riohacha en Colombia, con el ánimo de determinar la calidad del aire que respiran sus habitantes. Luego, nos encontramos con dos artículos de interés para aquellos estudiosos del área de Control. El primero, muestra el diseño de controladores multivariables aplicados a un intercambiador de calor, mientras el segundo, muestra un diseño de controlador de intensidad luminosa para optimizar procesos de fotocurado. Una interesante reflexión, acerca del panorama del sector eléctrico y la posible inclusión de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia, es encontrada a continuación. Siguiendo nuestra marcha a través de la publicación, nos encontramos con una interesante aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica, dentro del marco del uso eficiente de la energía, el análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Se cierra este volumen, con dos atractivos artículos dentro de la línea de la gestión en ingeniería. El primero, muestra el impacto de las normas ISO9000 en el mejoramiento continuo de los procesos industriales y sugiere técnicas y herramientas para su adecuada implementación. El número finaliza con un importante análisis de la deserción estudiantil en la Uptc, problemática de alto interés en las instituciones de Educación Superior de nuestro país.

Finalmente, no queda más, que invitar a toda la comunidad científica del área de la ingeniería, a someter sus artículos-productos de investigación a I²+D. Para nosotros, será un placer servirles y agradecerles por sus importantes aportes al crecimiento de la investigación en nuestra región.

Sinceramente,

PhD. Jorge Julián Moreno Rubio
Editor Invitado.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ EN LA ATMÓSFERA DE RIOHACHA-LA GUAJIRA COLOMBIA

Chemical particulate matter PM₁₀ in the atmosphere of Riohacha - La Guajira Colombia

Carlos Doria Argumedo^{1,2}, Juan Reynerio Fagundo Castillo²

¹Universidad de la Guajira, Facultad de Ingeniería, Colombia. Email: cdoria@uniguajira.edu.co

²Universidad de la Habana, Facultad de Química, Cuba. Email: Cuba.juan_fagundo@fq.uh.cu

(Recepción abril 20 de 2016 y aceptación septiembre 8 de 2016)

Resumen

Teniendo en cuenta la importancia desde el punto de vista de la contaminación ambiental, que tienen las partículas inhalables PM₁₀ en ambientes urbanos, y que los efectos que se puedan generar en la salud dependen de la composición química del material formado por partículas, se realizó este estudio con el objetivo de revelar la composición química de las partículas atmosféricas a través de técnicas de Espectrofotometría UV-VIS y Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento, generados principalmente por fuentes naturales y antrópicas en la ciudad de Riohacha al norte de Colombia; para ello se recolectaron 30 muestras de partículas atmosféricas por medio de filtros de cuarzo con una frecuencia mensual, durante el período de marzo a diciembre de 2014. Las PM₁₀ presentan una concentración promedio de 52,9 µg/m³ y los iones solubles de mayor concentración corresponden a Na⁺, Cl⁻, Ca⁺² y Mg⁺². Las diferencias entre los sitios de muestreo no fueron significativas (p > 0,6). El 70% del Ca⁺² es de origen no marino, atribuyéndose al suelo y al tráfico vehicular y peatonal. Conocer la composición química del material particulado, PM₁₀ tiene relevancia no sólo desde el punto de vista de la química de la atmósfera, sino también sobre la calidad del aire que se respira en las ciudades.

Palabras Clave: Partículas atmosféricas, iones solubles, aerosol marino, Riohacha

Abstract

Given the importance from the point of view of environmental pollution, which have inhalable particles PM10 in urban environments, and the effects that may arise health depend on the chemical composition of the material consists of particles, this study was conducted with the aim of revealing the chemical composition of atmospheric particles through techniques UV-VIS spectrophotometry and Mass Spectrometry Coupled Plasma source, generated mainly by natural and anthropogenic sources in the city of Riohacha north of Colombia; for that 30 samples of atmospheric particles they were collected by quartz filters on a monthly basis during the period from March to December 2014. PM₁₀ have an average concentration of 52.9 µg / m³ and the highest concentration of soluble ions correspond to Na⁺, Cl⁻, Ca⁺² and Mg⁺². The differences between sampling sites were not significant (p > 0.6). 70% of Ca⁺² is not of marine origin, attributed to soil and vehicular traffic and people. Knowing the chemical composition of particulate matter, PM₁₀ is relevant not only from the point of view of atmospheric chemistry, but also on the quality of the air we breathe in cities.

Key words: Atmospheric particles, soluble ions, marine aerosol, Riohacha

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se define como la incorporación a la atmósfera de cualquier sustancia que altere sus propiedades físicas o químicas, en donde los contaminantes más comunes: el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, los hidro-

carburos, los oxidantes fotoquímicos y para efectos de este trabajo las de mayor interés son aquellas partículas cuya composición es muy variada. Las partículas atmosféricas, también denominadas aerosoles (suspensión de partículas en un gas), son importantes componentes de la atmósfera [1]. Intervienen activamente en la química y física de la atmósfera, especialmente en los procesos

Cómo citar este artículo:

C. Doria-A., & J.R. Fagundo – Castillo, "Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de Riohacha-la Guajira Colombia," Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo, vol. 17 N° 1, pp. 5-16, Enero, 2017.

de formación de nubes y en el balance radiactivo [2]. Los contaminantes pueden ser originados por fenómenos naturales o por diversas actividades humanas. Entre los procesos naturales se encuentran la actividad volcánica y algunas reacciones biológicas. Por otra parte, los procesos de combustión, las actividades industriales y el transporte hacen parte de las fuentes antrópicas más importantes en cuanto al tipo de contaminantes que se pueden generar. Las partículas menores a 10 μm o PM_{10} son partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera y están constituidas principalmente por sulfatos, nitratos, iones de amonio, ácidos, cloruros, agua, metales y carbón elemental y orgánico [3]. El principal problema de contaminación en las ciudades se debe a la presencia de partículas, las cuales pueden ser de suelo o estéril. Estas partículas son emitidas a la atmósfera por acción del viento, las fuentes de combustión, los puntos de transferencia de material u otras fuentes [4]. Los estudios que se han realizado sobre la calidad del aire de la ciudad de Riohacha han contemplado solo la concentración en masa del material particulado, pero no se ha tenido en cuenta la composición de iones solubles.

[5] realizó un estudio elemental de partículas respirables (PM_{10}) y Suspendidas Totales (PST) en la ciudad, indicando que la presencia de Zn, Cu y Co, tienen su origen a partir de fuentes antropogénicas, posiblemente del parque automotor y un enriquecimiento de Mg, Mn, V y K de procesos del suelo. Otros estudios en zonas cercanas a Riohacha, como es el caso del Estado Zulia (Venezuela) atribuyen la presencia de Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} en partículas ($>1,5 \mu\text{m}$) a un contraste entre emisiones naturales (rocío del mar, roca, arcilla y suelo) y antropogénicas (combustión de derivados del petróleo en los motores de vehículos, actividades industriales y empresas cementeras [6,7]).

Por lo anterior este trabajo se realizó con el objetivo de revelar la composición química de iones solubles en las partículas respirables (PM_{10}), permitiendo asociarlas a fuentes naturales y antropogénicas; bajo la consideración que algunos componentes químicos se asocian con daños específicos a la salud, principalmente algunos compuestos orgánicos, metales pesados y una gran variedad de especies químicas [8].

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio y localización de sitios de muestreo

Para determinar la composición química de las partículas, se colectaron 30 muestras de PM_{10} en la ciudad de Riohacha capital del Departamento de La Guajira (Colombia), localizada entre los $11^\circ 32'$ y $12^\circ 39'$ de latitud Norte y los $72^\circ 06'$ y $54^\circ 23'$ de longitud Oeste (Figura 1); con una frecuencia mensual durante el período de marzo a diciembre de 2014, teniendo en cuenta lo establecido en el protocolo y seguimiento de la calidad del aire [9]. Para la ubicación de las estaciones de muestreo se consideraron tres puntos localizados estratégicamente, teniendo en cuenta el área de influencia directa del tráfico peatonal y vehicular: El punto "A", su localización es la Corporación Autónoma Regional de La Guajira – Corpoguajira (Carrera 7 No 12-15), el punto "B" en el Instituto de Bienestar Familiar – ICBF (Carrera 15 No 15-00), y el punto "C" en el campus de la Universidad de La Guajira (Kilómetro 5 vía a Maicao) (Figura 1).

Las muestras de partículas atmosféricas se recolectaron por medio de filtros de cuarzo de $23,3 \times 25,4$ cm mediante muestreadores de alto volumen PM_{10} (Hi-Vol VFC). Estos filtros cuentan con un pH ligeramente mayor a 7,5 y una eficiencia de colección del 99% de partículas $>0,3$ micrómetros de diámetro [10]. Los filtros fueron acondicionados 24 horas antes de pesarlos a una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 45 %. El tiempo de muestreo fue 24 horas continuas con flujo entre $1,10$ y $1,34 \text{ m}^3/\text{min}$.

2.2 Análisis químico de filtros

Después de colectadas las muestras de PM_{10} , del acondicionamiento de los filtros y determinada la concentración de partículas mediante el método gravimétrico, se realizó la digestión en medio acuoso de los filtros. Para tal fin a $\frac{1}{2}$ del filtro se le realizó una extracción acuosa en caliente (80°C). Posterior a la extracción se realizó filtración al vacío (filtro Whatman de fibra de vidrio $0,45 \mu\text{m}$, $0,47 \text{ mm}\varnothing$) para obtener un extracto final de aproximadamente 200 ml el cual fue llevado a un balón aforado diluyendo a 250 ml con agua desionizada [11]. Finalmente los extractos se guardaron en envases de polipropileno para su posterior análisis en los equipos: Espectrofotómetro HACH DR5000 (NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} y NH_4^+) y ICP-MS Agilent Technologies 7000 (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2}).

Para el análisis estadístico se aplicaron varios criterios como la prueba de rechazo de Chauvenet, pruebas de medias normales, con varianza y medias desconocidas

t-Student, coeficiente de correlación lineal, series de tiempo (para el caso de las concentraciones en los diferentes períodos de monitoreo), análisis de correlación (entre concentración de iones) y análisis de componentes principales para las concentraciones en los diferentes sitios de monitoreo con el objeto de determinar posibles asociaciones (procedimiento de rotación Varimax); mediante la utilización del software SPSS versión 21 IBM. Teniendo en cuenta que durante los procesos de extracción y análisis de las muestras se pierde cantidad de masa de cada ión, se procedió a determinar los respectivos porcentajes de recuperación en muestra preparada de concentración conocida y el respectivo análisis de un filtro de cuarzo en blanco.

2.3 Estandarización del método analítico

Para la validación del método y el tratamiento de las muestras se tuvo en cuenta la evaluación de los parámetros de linealidad, precisión, exactitud, límite de detección y de cuantificación. Para la linealidad, se tomaron alícuotas correspondientes a seis concentraciones diferentes (0,0005, 0,001, 0,005, 0,01, 0,1 y 0,5 mg/L) de las disoluciones patrón en el rango de aplicación del método, la precisión fue realizada por determinación de la desviación estándar y coeficiente de variación (CV) de los resultados del análisis, para $n=10$, de muestras reales en condiciones de repetibilidad, la exactitud, fue definida en términos de porcentaje de error relativo, para los estándares analizados este porcentaje de error relativo fue menor a lo esperado (<5%) para dos analistas diferentes. La evaluación de los parámetros de calidad fue realizada para la concentración de 0,1 mg/L. Para la determinación de límite de detección y de cuantificación, se realizaron determinaciones en muestras de blancos o concentración baja del analito para $n=10$.

3. RESULTADOS

3.1 Control de Calidad

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los criterios tenidos en cuenta para la validación de método analítico. En general los valores registrados para este estudio, indicaron condiciones aceptables garantizando la confiabilidad de los resultados.

3.2 Condiciones meteorológicas durante el período de muestreo

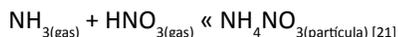
En Riohacha la dispersión de las partículas suspendidas y su disolución en la atmósfera está condicionada por los factores climáticos característicos de una zona costera que presenta temperatura promedio de 29,8°C (con intervalo 24, 8°C – 33,9°C), humedad relativa de 66,7%, velocidad del viento de 53,6 m/s en las direcciones principalmente oeste y noroeste, y promedio de lluvia de 124 mm [12]. La humedad en la atmósfera origina un problema de dispersión de la luz, reduciendo la visibilidad. Asimismo, cuando la humedad relativa excede el 70 %, muchos tipos de partículas presentan un cambio de fase y se convierten en gotas de niebla, lo cual también disminuye la visibilidad [13] y favorece la aparición de contaminantes secundarios peligrosos, tales como las sustancias responsables de la lluvia ácida. La fracción de compuestos solubles en el agua de las partículas suspendidas en la atmósfera contienen la mayoría de las especies biogeoquímicamente activas, y cuya evaluación constituye un aporte importante al estudio de los ciclos de los nutrientes en una región determinada [14].

3.3 Concentraciones de partículas y de iones solubles

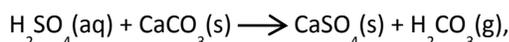
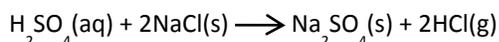
En una atmósfera urbana los aerosoles y las partículas sólidas en suspensión son los principales constituyentes, las cuales son fruto de diferentes actividades antropogénicas entre las que se tienen como de mayor importancia la combustión de carburantes fósiles, el tráfico y las combustiones fijas. Para el caso de Riohacha, la influencia de los vientos y el clima semidesértico de La Guajira, también favorecen la emisión y resuspensión de partículas en el aire, lo que explica una concentración media anual de 52,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 2A). Como se observa este valor supera el límite máximo permitido de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ propuesto por la OMS, y de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de acuerdo con la Norma Oficial Colombiana [15]. En cuanto a su contenido químico, los iones solubles de mayor concentración corresponden a Na^+ (3,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cl^- (0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca^{+2} (0,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Mg^{+2} (0,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabla 2A y 2B). De manera general se observa que en los puntos "A" y "B" se presentan las mayores concentraciones de los iones con respecto al punto "C" (Figuras 2 y 3), lo que indica la derivación de estas especies del tráfico peatonal y vehicular, y del aerosol marino, teniendo en cuenta que este último punto se encuentra a 5 km de la ciudad. La correlación significativa entre Na^+ y NO_3^- ($P=0,05$ $r=0,498$), Na^+ y NO_2^- ($P=0,05$ $r=0,735$), Na^+ y K^+ ($P=0,05$ $r=0,682$), Na^+ y Mg^{+2} ($P=0,05$ $r=0,894$), y Na^+ y Ca^{+2} ($P=0,05$ $r=0,458$); indican que de manera natural

el Na^+ , NO_3^- , NO_2^- , K^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2} se derivan del aerosol marino (Tabla 3) [16].

Como se puede observar en la Tabla 4, el sulfato se encuentra en exceso con respecto al agua de mar, el cual fue calculado usando Na^+ como referencia y la composición del agua de mar dada por [17]: $X^* = X_{\text{total}} - \text{Na}_{\text{total}}$ ($X_{\text{agua de mar}} / \text{Na}_{\text{agua de mar}}$), lo cual puede indicar que está asociado a la oxidación atmosférica de H_2O y otros gases o compuestos de azufre, producidos por el proceso de combustión de los vehículos automotores, como principales constituyentes del sulfato en la ciudad [18]. El estudio realizado por [7] en la ciudad de Maracaibo (Venezuela) indica que el exceso de sulfato con respecto al agua de mar es consecuencia del complejo Petroquímico y otras refinerías cercanas a la ciudad. Las emisiones de SO_2 y NO_2 proveniente de las áreas industriales se oxidan en la atmósfera a SO_4^{-2} y NO_3^- respectivamente, por reacciones homogéneas y heterogéneas durante su transporte [19]. Estos iones inorgánicos pueden ser neutralizados por NH_4^+ que es formado por el NH_3 gaseoso emitido en las áreas agrícolas. Ellos usualmente existen en la forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HSO_4 y NH_4NO_3 [20]. El NH_4^+ que se encuentra en baja concentración ($0,030 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabla 2A), indica que es poco probable la formación de NH_4NO_3 . La formación de nitrato de amonio en la atmósfera está regida por el equilibrio



La presencia de NH_4^+ en las partículas puede ser producto de las actividades pecuarias (cría de caprinos) que se desarrollan en las comunidades rurales indígenas cerca de la ciudad lo cual produce altas emisiones atmosféricas de NH_3 proveniente de los desechos o excretas del ganado [17] y que conducen finalmente a la formación de amonio por conversión química. En ambientes con concentraciones bajas de NH_4^+ y elevadas de Na^+ y/o Ca^{+2} es posible obtener también la neutralización del sulfato según las reacciones:



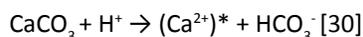
y la consecuente formación de sulfato sódico y cálcico particulado en suspensión [23].

El fosfato se encuentra en concentraciones relativamente bajas ($0,012 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sugiriendo al menos dos fuentes diferentes. El origen del PO_4^{-3} en las partículas podría ser a través de la oxidación de la PH_3 gaseosa [24] que es producida en los ambientes reductores y las heces [25-27], la otra fuente podría corresponder a procesos biológicos que ocurren en la vegetación o en los suelos [28].

El cloruro no presenta un exceso con respecto al aerosol marino, sino más bien existe un déficit de este ión en las partículas. Algo similar fue observado en los Llanos Centrales de Venezuela [28], [17]. Esto muestra que no existen fuentes significativas de Cl^- en la región. El déficit de Cl^- puede ser explicado por la liberación de HCl de las partículas, debido a su reacción con ácidos fuertes, según la reacción:



La Tabla 4 muestra que el exceso del Ca^+ con respecto al aerosol marino es muy alto, mayor del 50%, lo que permite indicar que la resuspensión del suelo provocada por el tráfico vehicular, se presenta como una fuente principal de emisión. Es decir que las concentraciones de Ca^{+2} deben estar relacionadas con la contribución importante del suelo de esta región tropical. Se considera que además de la influencia del aerosol marino, el material particulado puede provenir de la zona desértica, principalmente en la época de sequía, bajo la influencia del viento. El calcio presente en el polvo atmosférico se encuentra en la forma de carbonatos e interviene en forma significativa en la neutralización de los ácidos atmosféricos:



3.4 Distribución espacial y temporal de iones solubles en PM_{10}

En términos generales no se observa una variación significativa de las concentraciones de los iones contenidos en las partículas en los distintos puntos de estudio de la ciudad (Tabla 5), indicando en principio que estas especies son producidas por una misma fuente, la cual debe ser el aerosol marino y la formación de aerosoles calcáreos de Mg^{+2} y Ca^{+2} provenientes del suelo por turbulencia del viento y el tráfico vehicular.

Con relación a la asociación de los iones, en la Figura 4, que corresponde a los análisis de rotación indica que en el factor 1 las variables Na^+ , Ca^+ , Mg^{+2} , K^+ , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ y PO_4^{-3} estadísticamente corresponden a iones asociados; esto podría corresponder a su relación basada en que estas especies provienen de las mismas fuentes naturales como lo son el aerosol marino y el suelo. En cambio la variable correspondiente a SO_4^{-2} , ubicada en el factor 2, resulta independiente al no presentar asociaciones.

La Figura 5 ilustra mayores concentraciones de iones durante el período de sequía o verano que en el de invierno. El aumento en la concentraciones atmosféricas de los iones durante el verano, puede proponerse que se debe a factores como los vientos que tienen su mayor intensidad, con predominancia en la dirección nornordeste, lo cual favorece la resuspensión de partículas al suelo y el transporte de aerosoles marinos, además posibilita el transporte de partículas suspendidas de la región desértica del norte del territorio de La Guajira; durante la época de invierno el lavado de las partículas solubles disminuye su concentración atmosférica total, y finalmente las quemaduras o incendios de material vegetal que se suceden en la época de verano, en las zonas agrícolas de las áreas rurales, producen emisiones primarias de K^+ y Ca^{+2} [31].

En Colombia la Resolución 610 de 2010 que corresponde a la norma de calidad del aire no incluye límites de concentración para los iones determinados en este estudio a nivel de partículas atmosféricas. Al comparar las concentraciones de los iones de las partículas en la atmósfera de Riohacha con otras regiones del mundo se observa (Tabla 6) que la concentración de Cl^- es muy baja (entre 10 y 60 veces menor), pero el Na^+ se presenta en concentración parecida, con las reportadas en zonas de Venezuela muy cerca de La Guajira colombiana, como es el caso de Paraguaipoa y Maracaibo, cuyas atmósferas están influenciadas fuertemente por el aerosol marino [31], [7]. El SO_4^{-2} también es menor su concentración que el reportado para Valencia (Venezuela), [32], Brasil [32], Atenas [33], India y Portugal [22].

CONCLUSIONES

Los niveles encontrados de partículas PM_{10} , están por encima de la norma nacional, lo que indica un nivel del aire no limpio. Los resultados obtenidos en este estudio ponen de manifiesto que en el aire de la ciudad de

Riohacha, hay presencia de metales alcalinos como Na^+ y K^+ , de metales alcalino-térreos como Ca^{+2} y Mg^{+2} , y de iones solubles como Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , y NH_4^+ , asociados a las PM_{10} provenientes de fuentes naturales y antrópicas.

La presencia de sodio, potasio y cloro proceden de fuentes naturales (aerosol marino). El calcio, el magnesio y el sulfato proceden de fuentes naturales (aerosol marino) y antrópicas (principalmente el tráfico peatonal y vehicular)

La concentración de las especies químicas presentes en las partículas atmosféricas disminuyen en la época de lluvias (Agosto- Diciembre) en comparación con la época de sequía (Marzo- Julio).

El conocimiento generado en este tipo de estudios puede utilizarse como una herramienta de control y prevención en beneficio de la calidad del aire en localidades ubicadas en zonas costeras, y en donde se desarrolla una alta movilidad peatonal y vehicular; ya que la identificación y cuantificación de la composición química de las partículas atmosféricas, aporta valiosa información para establecer la influencia de actividades de origen natural o antrópico.

REFERENCIAS

- [1] B.J. Finlayson-Pitts and J.N. Pitts, *Chemistry of the upper and lower atmosphere. Theory, experiments, and applications*. EEUU, Nueva York: Academic Press, 2000.
- [2] J. Penner, M. Andreae, M. Annegan, H. Barrie, L., Feichter, J., Heg et al., "Aerosols, their direct and indirect effects," In *En Climate Change 2001, the Scientific Basis*. Cambridge, RU: Cambridge University Press, pp. 289-348.
- [3] O. Amador, A. Delgado, R. Villalobos, Z. Munive, R. Ortiz, G. Díaz, et al., "Partículas suspendidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y mutagenicidad en el Suroeste de la Ciudad de México," Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana de México, México, 2001.
- [4] K.Juda-Rezler, M. Reizer, J. Oudinet, "Determination and analysis of PM_{10} source apportionment during episodes of air pollution in central eastern European urban areas: The case of wintertime 2006," *Atmospheric Environment*, vol. 45(36), pp. 6557-6566, Nov 2011.

- [5] R. Rojano, H. Arregocés, G. Restrepo, Composición Elemental y Fuentes de Origen de Partículas Respirables (PM₁₀) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el Área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia. *Información Tecnológica*. Vol. 25(6), pp. 13-12, 2014.
- [6] J. Morales, D. Pirela, and J. Durán, "Determinations of levels of Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn and Cu in aerosols of the western Venezuelan Savannah Region," *Sci. Tot. Env.*, vol. 180(2), pp. 155-164, 1995.
- [7] L. Sánchez, "Estudio sobre la remoción de contaminantes atmosféricos en el aire de la ciudad de Maracaibo", Trabajo de grado, Posgrado en Química, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1998.
- [8] M. Castillejos, "Caracterización de las circunstancias clínicas y epidemiológicas que rodean las muertes en días de alta y baja concentración de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) y otros contaminantes atmosféricos en la zona suroeste del área metropolitana de la ciudad de México", Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana de México, México, 1999.
- [9] *Protocolo para muestreo de partículas respirables (PM₁₀) utilizando el equipo muestreador de alto volumen PM₁₀ de flujo constante*. REDAIRE- Red de Vigilancia de la calidad del aire, 2013, disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/redaire/.10/07/2013>
- [10] *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*, K-2 Ingeniería. MAVDT- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia, 2008.
- [11] C. Doria, *Estudio sobre la composición química de la lluvia y partículas suspendidas en un sitio del área de influencia de las actividades de explotación del carbón mineral en La Guajira Colombiana*, Trabajo de grado. Posgrado en Química. Facultad Experimental de Ciencias. Maracaibo: Universidad del Zulia, 2002.
- [12] *Tiempo y clima*, IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014, Disponible en: www.ideam.gov.co/web/tiempoyclima.10/12/2014
- [13] ICLAM, "Evaluación de la calidad del aire en los municipios Maracaibo, San Francisco y Páez. Niveles y Tendencias.1995–2003", Estado Zulia, Venezuela, 2004.
- [14] X. Doménech, *Química Atmosférica. Origen y efectos de la contaminación*, Miraguano Ediciones: Madrid, 1995.
- [15] MAVDT-Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 610 "Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006" "la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional*, Bogotá, 2010.
- [16] M. Pacheco, E. Sanhueza, J. Romero, "Química atmosférica en la Gran Sabana II: Distribución de tamaño y composición de los aerosoles solubles en agua," *Interciencia* vol 30, n°. 10, pp. 602-610, Oct. 2005.
- [17] E. Sanhueza, and A. Rondón, "Particle-Size Distribution of inorganic water soluble ions in the Venezuelan Savannah atmosphere during burning and non-burning periods," *J. Atmospheric. Chem.*, vol. 7, n° 4, pp. 369-388, Noviembre. 1988.
- [18] C.A. Pope, M.J. Thun, M.M. Namboodiri, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.E. Speizer, and C.W. Heath Jr, "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S adults," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 151, pp. 669-674, 1995.
- [19] Z. Kai, W. Yuesi, W. Tianxue, M. Yousef, M. Frank, "Properties of nitrate, sulfate and ammonium in typical polluted atmospheric (PM₁₀)," in *Beijing. Atmos. Res.*, vol. 84, pp. 67-77, March, 2007.
- [20] Y. Ham, J. Kobori, H. Kang, J. Kim, "Ammonium nitrogen deposition as a dominant source of nitrogen in a forested watershed experiencing acid rain in central Japan," *Water, Air, Soil Poll.*, vol. 212, pp. 337-344, 2010.
- [21] H.B. Singh, "Reactive nitrogen in the troposphere," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, (4), pp. 320-327, April, 1987. DOI:<https://doi.org/10.1021/es00158a001>
- [22] E. Sanhueza, P. Crutzen, "Budget of fixed nitrogen in the Orinoco savannah region: The role of pyrodenitrification," *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 12, n° 4, pp. 653-666, December, 1998.
- [23] D. Hitchcock, L. Spiller, W. Wilson, "Sulfuric acid aerosols and HCl release in coastal atmospheres: evidence of rapid formation on sulfuric acid particulates," *Atmosphere Environment*, vol.14 n° 1, pp. 65-182, 1980.
- [24] I. Dévai, L. Felföldy, I. Wittner, S. Plósz, "Detection of phosphine: new aspects of the phosphorus cycle in the hydrosphere," *Nature*, vol. 333, pp. 343-345, May. 1988. DOI: <https://doi.org/10.1038/333343a0>.
- [25] A. Mehlmann, P. Warneck, "Atmospheric gaseous HNO₃. Particulate nitrate and aerosol size distribution of major ionic species at a rural site in Western

- Germany," *Atmospheric Environment*, vol. 29, pp. 2359-2373, Sep. 1995.
- [26] D. Glindemann, A. Bergmann, U. Stottmeister, G. Gassmann, "Phosphine in the lower terrestrial troposphere," *Naturwissensch*, vol. 83, pp. 131-133, 1996.
- [27] S. Han, Y. Zhuang, J. Liu, D. Glindemann, "Phosphorus cycling through phosphine in paddy fields," *Sci. Total En.*, vol. 258, pp. 195-203, 2000.
- [28] Arias, M. (1989). Depositiones atmosféricas de Compuestos solubles en agua en la Sabana Venezolana. Charuaras, Estado Guárico. Trabajo de grado. Instituto venezolano de Investigaciones Científicas. Centro de Estudios Avanzados. Caracas.
- [29] M. Huo, Q. Sun, Y. Bai, P. Xie, Z. Liu, X. Wang, J. Li, "Acidic and basic properties and buffer capacity of airborne particulate matter in an urban area of Beijing," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 176, pp. 355-364, 2011.
- [30] R. Wayne, *Chemistry of atmosphere*, Clarendon Press, USA: Oxford University press, 1985.
- [31] J. Morales, "Estudio sobre la composición química de las deposiciones atmosféricas en la cuenca del Lago de Maracaibo," Trabajo de grado, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Caracas, Caracas, 1992.
- [32] Y.J. Martínez, "Partículas suspendidas totales y contenido de nitrato, cloruro y sulfato en el aire de dos zonas de valencia," Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, pp. 163-174, 1997.
- [33] D. Sikiotis, P. Kirkitos, "The adverse effects of nitrates on stone monuments," *Sci. Total Env.* vol. 171 (1-3) pp. 173-182, October, 1995.
- [34] Corpoguajira - Corporación Autónoma Regional de La Guajira, "Condiciones climáticas de La Guajira año 2013", División de Control y Monitoreo Ambiental, Reporte Anual, Riohacha, 2014.

Tabla 1. Resultados de los parámetros de control de calidad de los métodos analíticos correspondientes a los iones

| Parámetro | R | Desviación Estándar | Coeficiente de variación (%) | Exactitud | LDM = X+t*s | LCM= X+3*s |
|-------------------------------|---------|---------------------|------------------------------|-----------|-------------|------------|
| | | | | (%) | | |
| NH ₄ ⁺ | 0,99967 | 0,07 | 0,056 | 4,23 | 0,0009 | 0,0011 |
| NO ₃ ⁻ | 0,99997 | 0,06 | 0,047 | 4,01 | 0,0009 | 0,0011 |
| PO ₄ ⁻³ | 0,99998 | 0,08 | 0,052 | 3,98 | 0,0032 | 0,0055 |
| Cl ⁻ | 0,99986 | 0,04 | 0,044 | 4,25 | 0,020 | 0,043 |
| NO ₂ ⁻ | 0,99996 | 0,07 | 0,067 | 4,09 | 0,00002 | 0,00004 |
| SO ₄ ⁻² | 0,99995 | 0,03 | 0,045 | 3,88 | 0,0001 | 0,0003 |
| Ca ⁺² | 0,99993 | 0,06 | 0,055 | 3,35 | 0,030 | 0,053 |
| Na ⁺ | 0,99998 | 0,05 | 0,049 | 3,89 | 0,017 | 0,040 |
| K ⁺ | 0,99993 | 0,04 | 0,061 | 4,12 | 0,0005 | 0,0028 |
| Mg ⁺² | 0,99996 | 0,04 | 0,059 | 4,16 | 0,012 | 0,035 |

Tabla 2A. Concentraciones partículas y del contenido químico (µg/m³)

| Sitio | No de observaciones | µg/m ³ | Cl ⁻ | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ⁻³ (µg/m ³) | SO ₄ ⁻² |
|-----------------|---------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------|
| | | | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) |
| A | 10 | 53,2 | 0,22 | 0,00063 | 0,0046 | 0,013 | 0,07 |
| B | 10 | 53,1 | 0,21 | 0,00070 | 0,0063 | 0,013 | 0,13 |
| C | 10 | 52,6 | 0,19 | 0,00053 | 0,0043 | 0,011 | 0,25 |
| <i>Promedio</i> | <i>10</i> | <i>52,9</i> | <i>0,20</i> | <i>0,0015</i> | <i>0,005</i> | <i>0,012</i> | <i>0,15</i> |

Tabla 2B. Concentración del contenido químico (µg/m³) en partículas

| Sitio | No de observaciones | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² |
|-----------------|---------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) | (µg/m ³) |
| A | 10 | 4,15 | 0,030 | 0,15 | 0,99 | 0,41 |
| B | 10 | 4,42 | 0,032 | 0,12 | 1,04 | 0,48 |
| C | 10 | 2,70 | 0,029 | 0,033 | 0,34 | 0,18 |
| <i>Promedio</i> | <i>10</i> | <i>3,76</i> | <i>0,030</i> | <i>0,098</i> | <i>0,79</i> | <i>0,35</i> |

Tabla 3. Matriz de correlaciones entre los iones de las partículas atmosféricas

| | Cl ⁻ | NH ₄ ⁺ | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ⁻³ | SO ₄ ⁻² | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| Cl ⁻ | 1 | 0,068 | -0,023 | 0,196 | -0,131 | -0,241 | 0,136 | 0,167 | 0,136 | 0,162 |
| NH ₄ ⁺ | | 1 | 0,020 | -0,143 | 0,138 | -0,036 | 0,002 | 0,280 | 0,158 | 0,154 |
| NO ₂ ⁻ | | | 1 | 0,424 | 0,062 | 0,034 | 0,735 | 0,412 | 0,202 | 0,620 |
| NO ₃ ⁻ | | | | 1 | -0,018 | -0,250 | 0,498 | 0,372 | 0,235 | 0,493 |
| PO ₄ ⁻³ | | | | | 1 | 0,034 | 0,237 | 0,187 | 0,036 | 0,244 |
| SO ₄ ⁻² | | | | | | 1 | -0,084 | -0,125 | -0,027 | -0,177 |
| Na ⁺ | | | | | | | 1 | 0,682 | 0,458 | 0,894 |
| K ⁺ | | | | | | | | 1 | 0,773 | 0,838 |
| Ca ⁺² | | | | | | | | | 1 | 0,664 |
| Mg ⁺² | | | | | | | | | | 1 |

Tabla 4. Exceso de concentración de los iones de las partículas con respecto al agua de mar

| Ion | Concentración Atmosférica | Concentración Exceso | % Exceso |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------|----------|
| Na ⁺ | 2,38 | - | - |
| K ⁺ | 0,098 | 0,077 | 7,7 |
| Ca ⁺² | 0,79 | 0,746 | 74,6 |
| Mg ⁺² | 0,36 | 0,108 | 10,8 |
| SO ₄ ⁻² | 0,15 | 0,03 | 3,0 |

Tabla 5. Valores de los coeficientes de variación de las concentraciones de los iones en los sitios de muestreo.

| Ion/Sitio | A | B | C |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| Cl ⁻ | 0,018 | 0,06 | 0,036 |
| NO ₃ ⁻ | * | * | * |
| NO ₂ ⁻ | * | 0,07 | * |
| SO ₄ ⁻² | 0,84 | 0,24 | 1,19 |
| PO ₄ ⁻³ | * | * | * |
| NH ₄ ⁺ | 0,34 | 0,047 | * |
| Na ⁺ | 0,42 | 3,54 | 0,26 |
| K ⁺ | 0,13 | 0,12 | 0,12 |
| Ca ⁺ | 0,24 | 0,22 | 0,12 |
| Mg ⁺ | 0,28 | 0,49 | 0,17 |

*Varianza = 0

Tabla 6. Comparación de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de iones solubles en partículas atmosféricas de Riohacha con otras zonas del mundo

| Lugar | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | NO ₃ ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | NH ₄ ⁺ |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------|
| Riohacha Este estudio | 0,20 | 0,15 | 0,005 | 3,75 | 0,098 | 0,79 | 0,36 | 0,030 |
| Paraguaipoa (Ven) [31] | 12,5 | 1,2 | 0,1 | 4,1 | 0,3 | 0,5 | 0,9 | |
| Maracaibo [7] | 2,8 | 3,2 | 1,5 | 2,5 | 0,2 | 6,6 | 0,8 | |
| Valencia Martínez 1977 | 2,2 | 1,71 | 9,28 | | | | | |
| India [30] | 4,3 | 2,0 | 1,32 | | | | | |
| Amazonas (Brasil) (Martínez, 1977) | 0,10 | 0,42 | 0,21 | 0,13 | 0,10 | | | 2,0 |
| Portugal [30] | 11,7 | 5,71 | 1,77 | | | | | |
| Atenas [33] | | 14,64 | 4,84 | | | | | |
| Alemania (zona rural) [25] | | | 5,20 | | | | | |

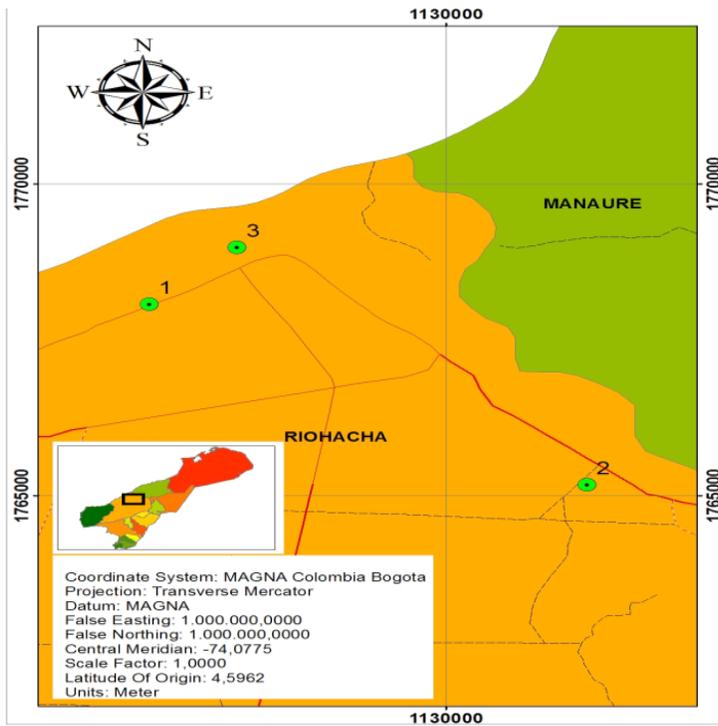


Figura 1. Mapa de Riohacha y ubicación de puntos de muestreo de partículas atmosféricas (Esc 1:10000).

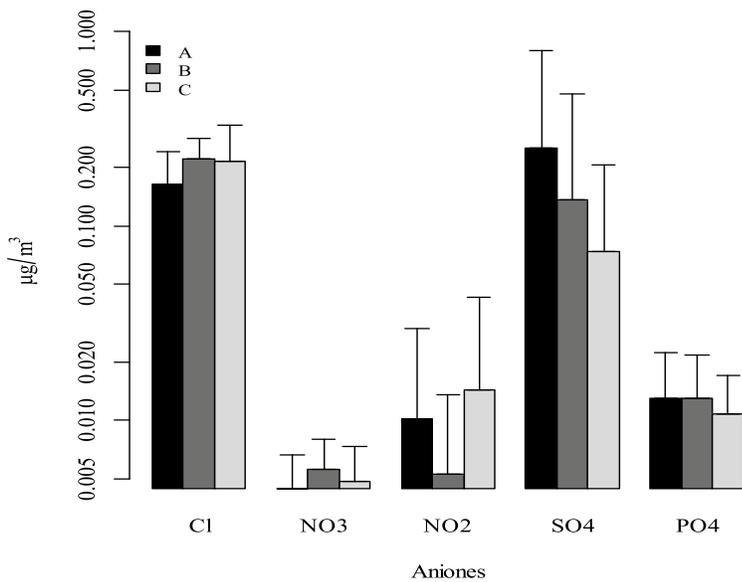


Figura 2. Variación de la concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los aniones en los sitios de muestreo.

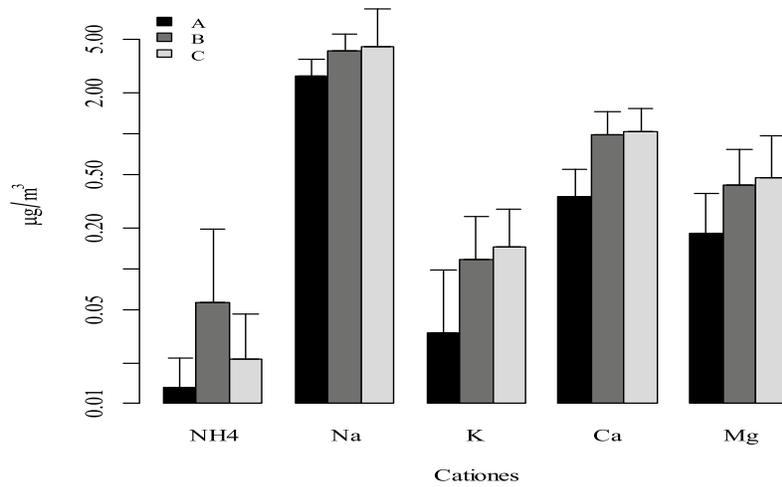


Figura 3. Variación de la concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de los cationes en los sitios de muestreo.

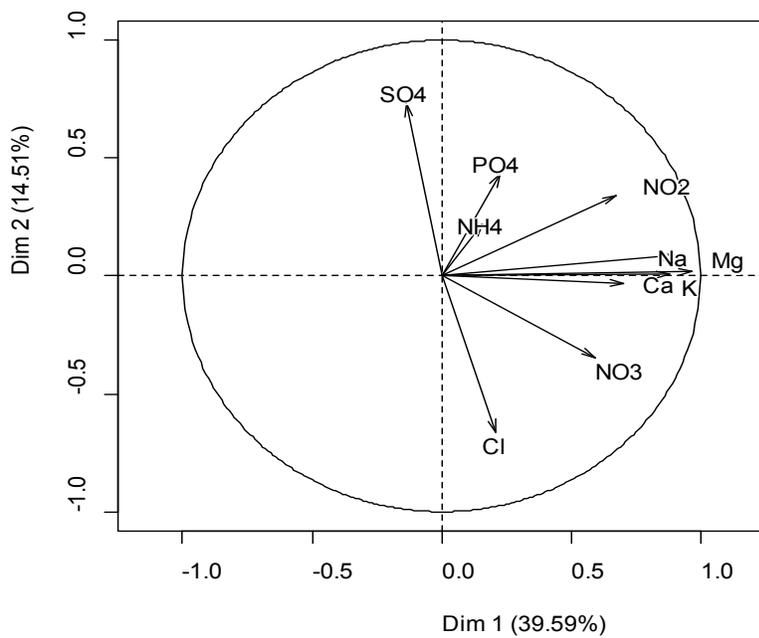


Figura 4. Matriz de factores rotados correspondiente a los iones

Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de Riohacha-la Guajira Colombia

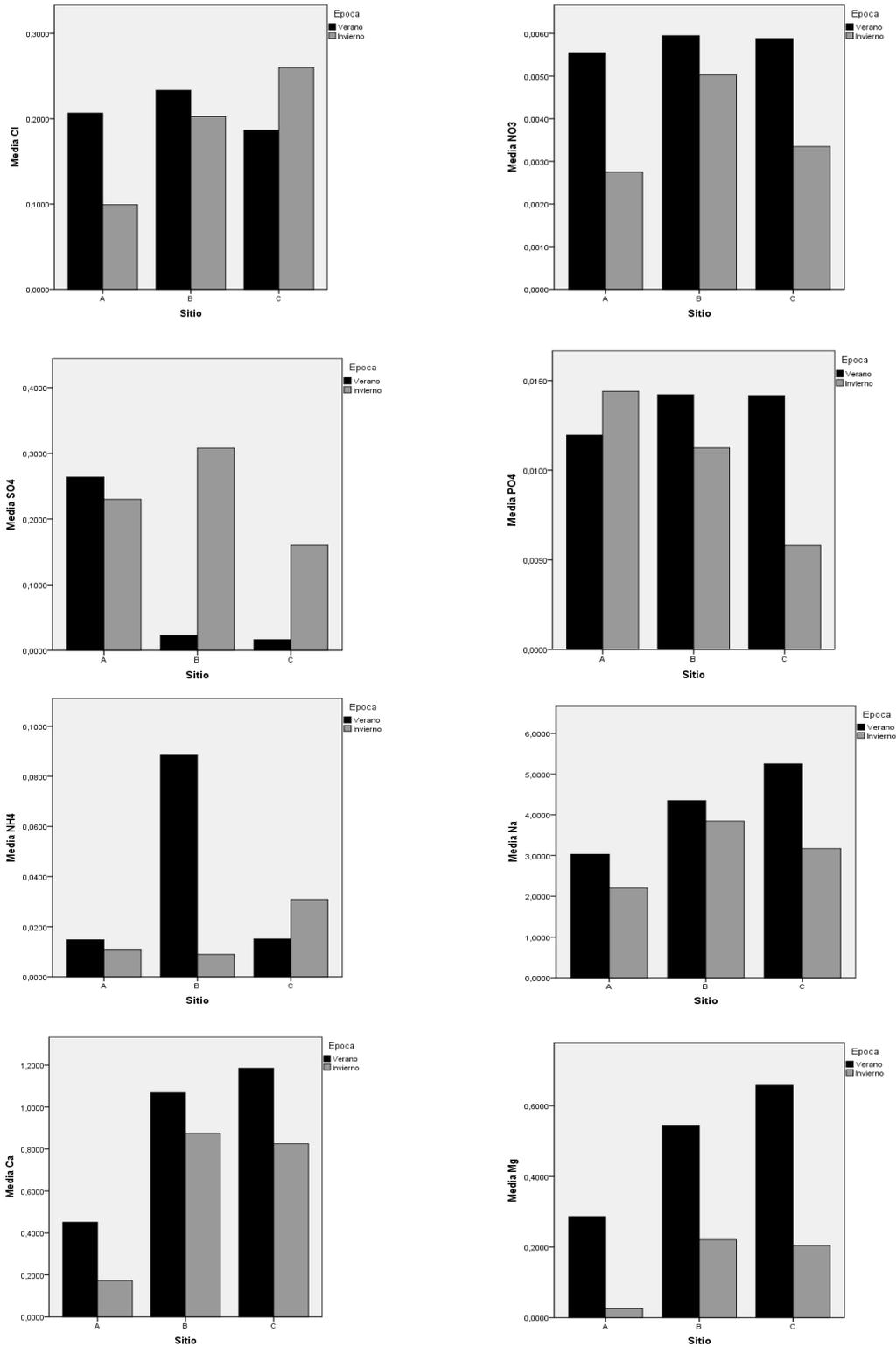


Figura 5. Variación estacional de las concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de iones en las Partículas atmosféricas PM₁₀ Riohacha. Colombia.

CONTROL MULTIVARIABLE LINEAL CON DESACOPLES EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Linear multivariable control with decoupling in a heat exchanger

Jaime Freddy Ricardo Barrera¹, Edgar Barrios Urueña¹

¹Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica, Grupo Inv. Automatización, Instrumentación y Control, Colombia. Email: jricardo01976@hotmail.com, baredgar@gmail.com

(Recibido septiembre 19 de 2016 y aceptado 11 de noviembre de 2016)

Resumen

El presente artículo describe la validación de los diseños de control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Hysys, cuyo interés se centró en analizar las diferentes respuestas del sistema MIMO cuando se realizó el control regulatorio con diferentes desacopladores y sin desacoplador. Se usaron tres tipos de desacopladores: Simplificado de Estado Estacionario, Simplificado y Generalizado. Los valores de las consignas fueron 60 °C para la temperatura del caudal a la salida de los tubos, y 41 °C para la temperatura del caudal a la salida de la carcasa; las variables manipuladas fueron los caudales de entrada a los tubos y la carcasa, gracias a los porcentajes de apertura de las válvulas correspondientes. Se emplearon controladores PI que fueron sintonizados con la aplicación del diseño IMC. De los resultados se pudo apreciar que el desacople simplificado fue el que más disminuyó el efecto del acoplamiento.

Palabras clave: Control Multivariable, Controlador PI, Desacoplador, IMC, Intercambiador de Calor.

Abstract

This document describes the validation of linear multivariable control designs in a heat exchanger under virtual environment using Hysys, where the interest was focused on the analysis of the different responses of MIMO system when regulatory control was done with different decouplers and without decoupler. Three types of decoupling were used: Steady-State Simplified, Simplified and Generalized. The values of the set-points were 60 °C for the flow temperature at the outlet of the tubes, and 41 °C for the flow temperature at the outlet of the shell; the manipulated variables were the flows into the tubes and the shell, because percentages of opening the corresponding valves. PI controllers were tuned by IMC design and used to regulate the temperatures. By comparing the outcomes, it's evident that Simplified Decoupling is the best to reduce the effect of the disturbance by coupling.

Key words: Decoupling, Heat Exchanger, IMC, Multivariable Control, PI Control.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y manejo del control multivariable es uno de los temas importantes para procesos industriales, ya que muy frecuentemente, éstos son de naturaleza multivariable (MIMO). En las siguientes secciones se describe la validación de los diseños de control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Aspen Hysys®, en donde los valores de las Consignas para las Temperatura a las Salidas de los Tubos y la Carcasa son 60°C y 41°C respectivamente;

con un margen de error de $\pm 1\%$ en estado estacionario sobre dichas temperaturas.

Un análisis comparativo de las respuestas del sistema bajo control en lazo cerrado sin desacople y con los diferentes desacoples, arroja unos resultados en los que se puede apreciar que el desacople simplificado es el que más disminuye el efecto del acoplamiento, seguido del simplificado de estado estacionario y el desacople generalizado.

El trabajo de investigación fue financiado por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. UPB seccional Bucaramanga, kilómetro 7 vía Bucaramanga a Piedecuesta (Santander).

Cómo citar este artículo:

J.F. Ricardo Barrera, & E. Barrios Urueña, "Control multivariable lineal con desacople en un intercambiador de calor." *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 17-25, Enero, 2017.

2. ANTECEDENTES

En cuanto a publicaciones de trabajos anteriores relacionados con el control de intercambiadores de calor, como también con el control multivariable lineal, se describen sus resultados principales.

Según [1], se obtuvieron resultados de una simulación para una solución basada en el control óptimo aplicado a una red de intercambiadores de calor con derivación, los cuales mostraron que se puede lograr casi un desacoplo total entre las variables del proceso; adicionalmente, se manejó la estrategia de control H infinito.

No obstante [2], emplearon una metodología QFT en el desarrollo de un controlador multivariable robusto de un intercambiador de calor a escala de laboratorio, en el cual se tomaron en cuenta las incertidumbres y las no linealidades del proceso; con el fin de establecer robustez para el seguimiento al valor de la Consigna.

Además [3], utilizaron el modelo difuso Takagi-Sugeno, con el fin de diseñar controladores adecuados para el control de un intercambiador de calor de carcasa y tubo. La variable controlada fue la temperatura de la salida de la corriente de calentamiento y la variable manipulada fue el caudal volumétrico de la corriente de calentamiento. Los diseños de los controladores estuvieron probados mediante simulaciones en el entorno Matlab/Simulink, cuyos resultados, comparados con el control PID clásico, confirmaron el control exitoso del intercambiador de calor.

Así mismo [4], compararon los resultados de dos estrategias de control en una planta piloto de Intercambiador de Calor, al emplear Control Predictivo Generalizado y Control Adaptativo Predictivo Generalizado. Un modelo de entrada única salida única (SISO) se utilizó para fines de control, en donde los parámetros del modelo se calcularon en línea usando un algoritmo de identificación basado en el método de mínimos cuadrados recursivos (RLS). Los resultados obtenidos demuestran la eficacia y la superioridad del algoritmo propuesto en el Control Adaptativo Predictivo Generalizado.

Al respecto [5], en otro análisis comparativo de respuestas entre diferentes estrategias de control desacoplado para hacer la regulación del nivel en un tanque de doble proceso, utilizaron un método de control simple basado

en la división de dos lazos con controladores PID SISO, y luego se compararon las respuestas con las de otros métodos de control desacoplado, que involucraron desacoplamientos simplificado e ideal. Los controladores desacoplados diseñados fueron probados con éxito usando un PLC y MATLAB.

En tanto [6], desarrollaron un nuevo método de control centralizado PI/PID para procesos TITO, en el que se utilizó la intercomunicación descentralizada de un control con múltiples escalas no convencional. Se usaron ecuaciones de ajuste matemáticos para convertir sistemáticamente los controladores en una forma de controladores PID industriales centralizados.

De manera adicional [7], propusieron un control parcialmente descentralizado (PDC) para el problema de una caldera de referencia en el marco del cambio de carga y presión; puesto que, los sistemas de calderas son procesos multivariables no lineales que muestran grandes interacciones, como también, presentan restricciones de entrada en una amplia gama de condiciones de funcionamiento. En este trabajo se aplicó un método que combina las ventajas de un control descentralizado y las de un control centralizado multivariable, que consideró el acoplamiento de las plantas.

También [8], utilizaron dos controladores PI descentralizados para un sistema TITO que empleó desacoples, y que fueron diseñados tomando en cuenta las matrices de las funciones de transferencia del proceso y la del desacoplador, lográndose un rendimiento efectivo.

En tanto [9], diseñaron e implementaron dos controladores IMC-PI, para un proceso de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) con comportamiento no lineal, basado en cuatro tanques, de manera que el nivel del agua puede mantenerse en las posiciones deseadas en los dos tanques superiores sin tener en cuenta la interacción entre ellos. Se encontró que los controladores IMC-PI no pueden proporcionar el rendimiento satisfactorio debido a la interacción entre los tanques; por lo tanto, se usaron desacopladores que mejoraron el rendimiento del sistema bajo control en lazo cerrado.

3. METODOLOGÍA

Las etapas principales que fueron necesarias para la realización del proyecto de investigación fueron: estableci-

miento de una planta térmica, modelado de la planta térmica, sintonización de los controladores para la planta térmica, desacople simplificado de estado estacionario para la planta térmica, desacople simplificado para la planta térmica, desacople generalizado para la planta térmica, control multivariable lineal en Hysys.

3.1 Establecimiento de una planta térmica

El sistema térmico implementado en Hysys (Ver Figura 1) mediante el uso de un Intercambiador de Calor, Válvulas, caudales volumétricos para el agua que ingresa por los Tubos y la Carcasa, junto con otros elementos, poseen determinadas características (Ver Tabla 1).

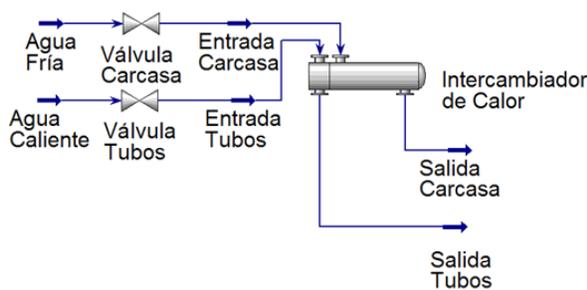


Figura 1. Sistema Térmico implementado en Hysys.

Tabla 1. Características de la Planta Térmica en Hysys.

| Parámetro | Valor |
|--|------------|
| Set-Point en los Tubos | 60 °C |
| Set-Point en la Carcasa | 41 °C |
| Perturbación en Tubos | - 8 °C |
| Perturbación en Carcasa | - 8 °C |
| Temperatura a la Entrada de los Tubos | 80 °C |
| Presión a la Entrada de los Tubos | 26.5 psia |
| Caudal Volumétrico en los Tubos | 280 Lt/min |
| Temperatura a la Entrada de la Carcasa | 20 °C |
| Presión a la Entrada de la Carcasa | 26.5 psia |
| Caudal Volumétrico en la Carcasa | 280 Lt/min |

3.2 Modelado de la planta térmica

Mediante el uso de la identificación de sistemas fueron determinados los modelos de la planta térmica con Funciones de Transferencia mostradas en las cuatro ecuaciones a continuación:

$$G_{11}(s) = \frac{0.4241}{148.6s + 1} \quad (1)$$

$$G_{12}(s) = -\frac{0.214}{(142.2s + 1)(28.4s + 1)} \quad (2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{0.0695}{(126s + 1)(26.4s + 1)} \quad (3)$$

$$G_{22}(s) = -\frac{0.5}{150s + 1} \quad (4)$$

$G_{11}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia los Tubos, con la Temperatura en la Salida de los Tubos. $G_{21}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia los Tubos, con la Temperatura en la Salida de la Carcasa. $G_{12}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia la Carcasa, con la Temperatura en la Salida de los Tubos. $G_{22}(s)$ es la Función de Transferencia que relaciona el porcentaje de Apertura de la Válvula hacia la Carcasa, con la Temperatura en la Salida de la Carcasa.

El modelo matemático del sistema basado en las anteriores cuatro funciones de transferencia, corresponde al siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 2). U_T es el Porcentaje de Apertura de la Válvula en la entrada de los Tubos, U_S es el Porcentaje de Apertura de la Válvula en la entrada de la Carcasa, Y_T o PV_{Tubos} es la Temperatura del agua a la salida de los Tubos, Y_S o $PV_{Carcasa}$ es la Temperatura del agua a la salida de la Carcasa.

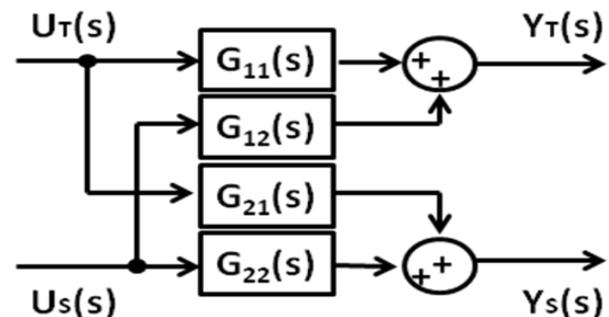


Figura 2. Modelo matemático del Sistema Térmico.

Luego se obtuvo la Matriz de Ganancias Relativas o RGA, expresada de la siguiente manera:

$$RGA[G(0)] = \begin{bmatrix} 1.075 & -0.075 \\ -0.075 & 1.075 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Según el resultado obtenido en la RGA el emparejamiento se muestra a continuación:

$$G_{TT}(s) = G_{11}(s) = \frac{0.4241}{148.6s + 1} \quad (6)$$

$$G_{SS}(s) = G_{22}(s) = -\frac{0.5}{150s + 1} \quad (7)$$

La función de Transferencia que representa el sistema de los Tubos es $G_{11}(s)$, y para la Carcasa es $G_{22}(s)$.

3.3 Sintonización de los Controladores para la Planta Térmica

Los controladores PI para controlar las temperaturas de los Tubos y la Carcasa, fueron sintonizados con la aplicación del diseño IMC y se terminaron de ajustar a través de pruebas en Simulink. Los controladores PID según la aplicación del diseño IMC son para sistemas FOPDT y Segundo orden.

$$PI(s)_{Tubos} = 2.33 \left(1 + \frac{1}{148.6 s} \right) \quad (8)$$

$$PI(s)_{Carcasa} = 2 \left(1 + \frac{1}{150 s} \right) \quad (9)$$

3.4 Desacople Simplificado de Estado Estacionario para la Planta Térmica

El desacoplador Simplificado de Estado Estacionario, consiste en dos compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema. El teorema del valor final es aplicado a cada una de las Funciones de Transferencia usadas en la determinación de los Desacoplos o Compensadores correspondientes.

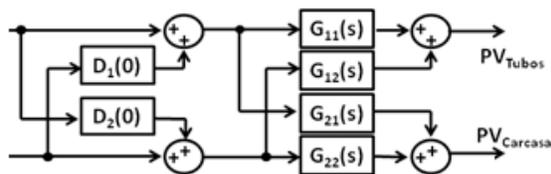


Figura 3. Ubicación del Desacoplador Simplificado de Estado Estacionario.

En la Ecuación 10 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_1(0)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_1(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_2(s)$ con la Salida 1 o $Y_1(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 2 y la Salida 1.

En la Ecuación 11 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_2(0)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_2(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_1(s)$ con la Salida 2 o $Y_2(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 1 y la Salida 2.

A continuación se muestran las ecuaciones que permiten encontrar el desacoplador Simplificado de Estado Estacionario.

$$D_1(0) = -\frac{G_{12}(0)}{G_{11}(0)} = -\frac{-0.214}{0.4241} = 0.5 \quad (10)$$

$$D_2(0) = -\frac{G_{21}(0)}{G_{22}(0)} = -\frac{0.0695}{-0.5} = 0.139 \quad (11)$$

3.5 Desacople Simplificado para la Planta Térmica

El desacoplador Simplificado, consiste en dos compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema.

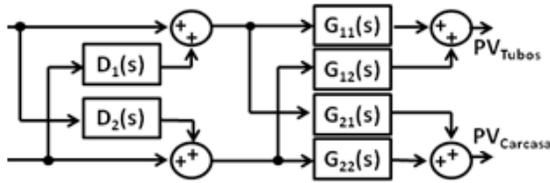


Figura 4. Ubicación del Desacoplador Simplificado.

En la Ecuación 12 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_1(s)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_T(s)$ con la Salida 2 o $Y_T(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_S(s)$ con la Salida 1 o $Y_T(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 2 y la Salida 1.

En la Ecuación 13 se puede apreciar que el Compensador o Desacople $D_2(s)$, está dependiendo de la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 2 o $U_S(s)$ con la Salida 2 o $Y_S(s)$, y la Función de Transferencia que relaciona la Entrada 1 o $U_T(s)$ con la Salida 2 o $Y_S(s)$, en donde ésta última es la que hace el acoplamiento no deseado entre la Entrada 1 y la Salida 2.

A continuación se muestran las ecuaciones que permiten encontrar el desacoplador Simplificado.

$$D_1(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = 0.5 \frac{(148.6s + 1)}{(142.2s + 1)(28.4s + 1)} \quad (12)$$

$$D_2(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = 0.139 \frac{(150s + 1)}{(126s + 1)(26.4s + 1)} \quad (13)$$

3.6 Desacople Generalizado para la Planta Térmica

El desacoplador Generalizado (Ver Figura 5), consiste en cuatro compensadores que sirven para minimizar el efecto de cada entrada del sistema con la salida que no le corresponde directamente; en otras palabras, reducir la acción del acoplamiento presente en el sistema. A diferencia de los desacopladores Simplificado de Estado Estacionario y Simplificado, el desacoplador Generalizado posee cuatro compensadores, y cada uno de ellos hace uso de las cuatro funciones de transferencia del sistema $G(s)$, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones matriciales.

$$D(s) = G(s)^{-1} G_R(s) \quad (14)$$

$$G_R(s) = \text{Diagonal}(G(s)) \quad (15)$$

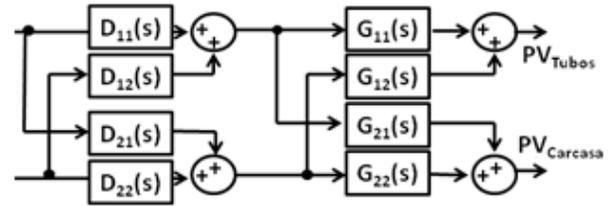


Figura 5. Ubicación del Desacoplador Generalizado.

Para el modelo matemático de la Planta Térmica $G(s)$ hecho con las cuatro Funciones de Transferencia $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, y $G_{22}(s)$, los compensadores $D_{11}(s)$, $D_{12}(s)$, $D_{21}(s)$, y $D_{22}(s)$ son los siguientes:

$$D_{11}(s) = 1 \frac{(142s + 1)(28s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (16)$$

$$D_{12}(s) = 0.5 \frac{(148s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (17)$$

$$D_{21}(s) = 0.138 \frac{(150s + 1)(142s + 1)(28s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (18)$$

$$D_{22}(s) = 1 \frac{(142s + 1)(28s + 1)(126s + 1)(26s + 1)}{(20.7s + 1)(39s + 1)(122s + 1)(142.5s + 1)} \quad (19)$$

3.7 Control Multivariable Lineal en Hysys

Se realizó en Hysys los controles multivariable lineales basados en PI para manejar el sistema modelado con RGA (Ver Figura 6), Funciones de Transferencia y Desacoplador Simplificado de Estado Estacionario (Ver Figura 7), Funciones de Transferencia y Desacoplador Simplificado (Ver Figura 8), y Funciones de Transferencia y Desacoplador Generalizado (Ver Figura 9).

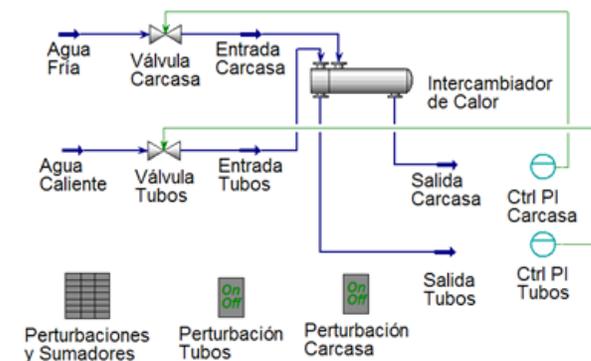


Figura 6. Control en Laço Cerrado sin Desacople.

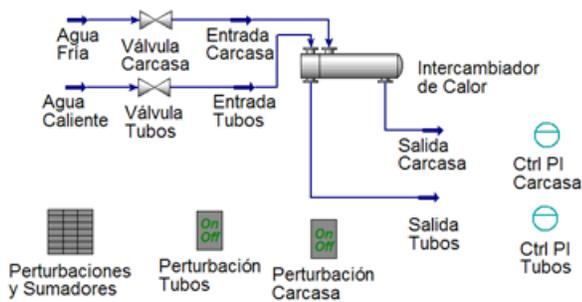


Figura 7. Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado de Estado Estacionario.

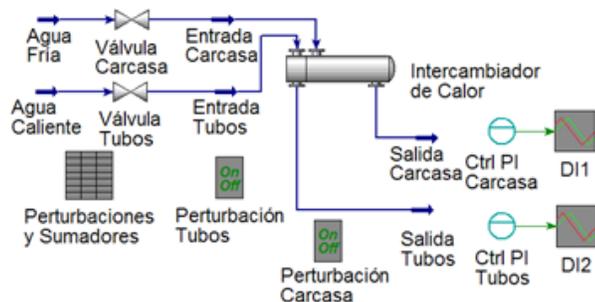


Figura 8. Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado.

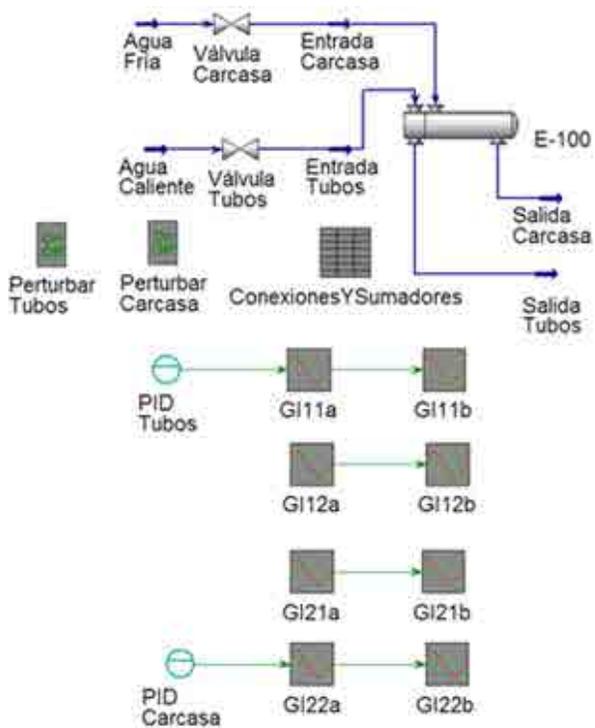


Figura 9. Control en lazo cerrado con desacople generalizado.

4. RESULTADOS

En los siguientes párrafos se realiza un análisis comparativo al implementarse los diseños de control multivariable lineal, mediante mediciones de las respuestas transitorias y de estado estacionario, frente a perturbaciones en las salidas del sistema. El sistema completo bajo control en lazo cerrado con desacoplos o sin éstos se representa en el siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 10).

Los valores de Consigna (SP) para las temperaturas a las salidas de los Tubos y de la Carcasa son 60°C y 41°C respectivamente, las perturbaciones cuando son aplicadas directamente sobre una de las dos salidas, hacen que ésta baje 8°C.

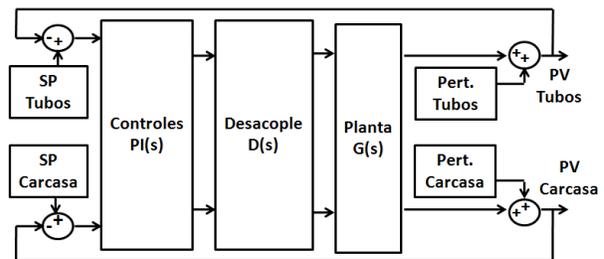


Figura 10. Diagrama de Bloques que representa al sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacoplos o sin éstos.

En las siguientes cuatro Figuras desde la 11 hasta la 14, se pueden apreciar los valores de las Temperaturas a las salidas de los Tubos (Color Rojo) y de la Carcasa (Color Azul). Cuando una salida es perturbada se puede apreciar el efecto de la perturbación sobre la otra salida, bajo control en lazo cerrado sin desacoplos y con éstos.

Durante la realización de una prueba bajo control en lazo cerrado sin desacople en Hysys, en la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de la Carcasa (Color Azul) y luego la de los Tubos (Color Rojo), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la gráfica a continuación (Ver Figura 11).

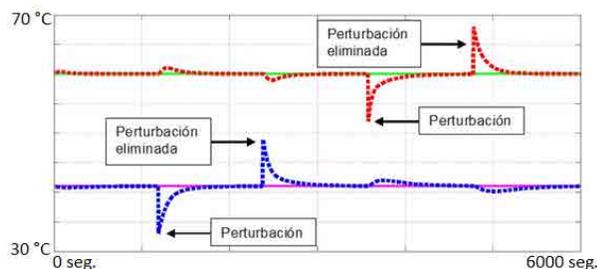


Figura 11. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado sin desacople.

En otra prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Simplificado de Estado Estacionario en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 12).

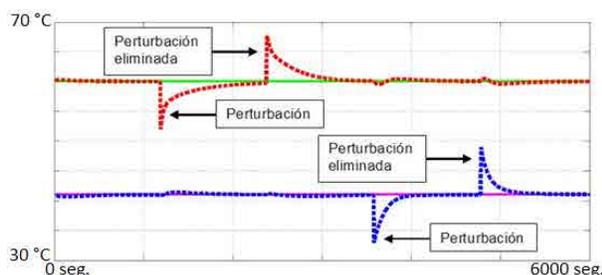


Figura 12. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacople simplificado de estado estacionario.

Así mismo, en otra prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Simplificado en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 13).

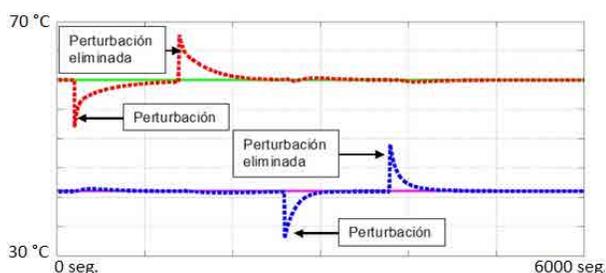


Figura 13. Respuesta del Sistema Térmico bajo Control en Lazo Cerrado con Desacople Simplificado.

De igual manera, una última prueba bajo control en lazo cerrado con desacoplador Generalizado en Hysys, sobre la cual primero se perturbó la Temperatura en salida de los Tubos (Color Rojo) y luego la de la Carcasa (Color Azul), se obtuvieron registros de los datos de dichas temperaturas que son presentados en la siguiente gráfica (Ver Figura 14).

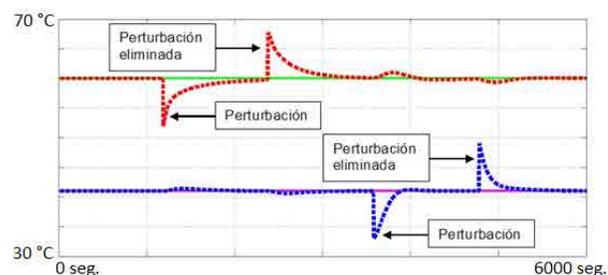


Figura 14. Respuesta del sistema térmico bajo control en lazo cerrado con desacople generalizado.

En las siguientes cuatro Tablas desde la 2 hasta la 5, se pueden apreciar los tiempos que requiere la salida que no es perturbada directamente, bajo el control en lazo cerrado con desacoples y sin éstos.

Tabla 2. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en la carcasa cuando se aplica la perturbación en los tubos.

| Tipo de Desacople | Tiempo |
|-------------------------------------|--------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 484 |
| Simplificado de Estado Estacionario | 73 |
| Simplificado | 0 |
| Generalizado | 0 |

Tabla 3. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en la Carcasa cuando se remueve la Perturbación en los Tubos.

| Tipo de Desacople | Tiempo |
|-------------------------------------|--------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 508 |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0 |
| Simplificado | 0 |
| Generalizado | 77 |

Tabla 4. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en los Tubos cuando se aplica la Perturbación en la Carcasa.

| Tipo de Desacople | Tiempo |
|-------------------------------------|--------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 175 |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0 |
| Simplificado | 0 |
| Generalizado | 232 |

Tabla 5. Tiempo en segundos fuera de la banda $\pm 1\%$ en los tubos cuando se remueve la perturbación en la carcasa.

| Tipo de Desacople | Tiempo |
|-------------------------------------|--------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 164 |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0 |
| Simplificado | 0 |
| Generalizado | 101 |

En las siguientes cuatro Tablas desde la 6 hasta la 9, se pueden apreciar los máximos porcentajes de error relativos que sufre la salida que no es perturbada directamente, bajo el control en lazo cerrado con desacoples y sin éstos.

Tabla 6. Máximo Porcentaje de error relativo en la temperatura de la carcasa cuando se aplica la perturbación en los tubos.

| Tipo de Desacople | % de Error Relativo |
|-------------------------------------|---------------------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 1.022 % |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0.951 % |
| Simplificado | 0.926 % |
| Generalizado | 1.024 % |

Tabla 7. Máximo porcentaje de error relativo en la temperatura de la carcasa cuando se remueve la perturbación en los tubos.

| Tipo de Desacople | % de Error Relativo |
|-------------------------------------|---------------------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 2.146 % |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0.609 % |
| Simplificado | 0.585 % |
| Generalizado | 1.048 % |

Tabla 8. Máximo porcentaje de error relativo en temperatura de los tubos cuando se aplica la perturbación en la carcasa.

| Tipo de Desacople | % de Error Relativo |
|-------------------------------------|---------------------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 1.650 % |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0.866 % |
| Simplificado | 0.550 % |
| Generalizado | 1.600 % |

Tabla 9. Máximo porcentaje de error relativo en la temperatura de los tubos cuando se remueve la perturbación en la carcasa.

| Tipo de Desacople | % de Error Relativo |
|-------------------------------------|---------------------|
| Sin Desacople (Ninguno) | 1.800 % |
| Simplificado de Estado Estacionario | 0.766 % |
| Simplificado | 0.500 % |
| Generalizado | 1.100 % |

Debido a que el modelo del sistema es nuevo, y por lo tanto, no hay antecedentes de controladores sobre el sistema trabajado, solo se pueden tomar en cuenta los datos registrados en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, que son los resultados obtenidos del análisis del comportamiento del sistema frente a perturbaciones para los diferentes tipos de desacoples que se emplearon. Según éstos datos, se puede apreciar que el desacople simplificado es el que más disminuye el efecto del acoplamiento, seguido del desacople simplificado de estado estacionario; lo que conlleva a que, el desacople generalizado es el más complejo para calcular y es el que menos ayuda a disminuir el efecto del acoplamiento.

Los tipos de desacoples recomendados para ser usados son el Simplificado y el Simplificado de Estado Estacionario, que pueden ser implementados en controladores lógicos con capacidad para realizar cálculos mediante las cuatro operaciones aritméticas a números de punto flotante, ya que el Simplificado requiere el uso de Ecuaciones en Diferencias, mientras que el Simplificado de Estado Estacionario necesita las multiplicaciones por constantes y las sumas.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo matemático de una planta térmica basada en un intercambiador de calor de tubos y carcasa bajo ambiente virtual en Hysys, cerca de las temperaturas de operación, dado que el sistema posee temperaturas constantes en los caudales entrantes a los tubos y la carcasa.

Los desacoples se calcularon sobre un modelo matemático lineal de la planta obtenido para las temperaturas de operación.

Se implementaron controladores PI para regular las temperaturas a las salidas de los tubos y la carcasa en Hysys, sintonizados mediante la aplicación del diseño.

Según los resultados al analizar el comportamiento del sistema en Hysys frente a perturbaciones para los diferentes tipos de desacoples empleados, el compensador que presentó mejor desempeño fue el Simplificado, seguido del Simplificado de Estado Estacionario y el Generalizado

Los resultados obtenidos en Hysys son debidos a que se emplean modelos no lineales que dan mayor aproximación al comportamiento de un sistema real.

El Desacople Generalizado al usar las cuatro funciones de transferencia de la planta identificada, requirió un procedimiento matemático complejo como también lo fue su implementación en Hysys.

El compensador usado para el Desacople Generalizado en Hysys necesitó ser ajustado de manera empírica después de haber sido calculado.

REFERENCIAS

- [1] F. Delatore, F. Leonardi, L. Novazzi, J. Da Cruz, Multivariable H-Infinity model matching control of a heat exchanger network (HEN) with bypasses. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/icca.2011.6138094>.
- [2] J. Rico, M. Gil-Martinez, Multivariable QFT robust control of a heat exchanger. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983125>.
- [3] A. Vasičkaninová, M. Bakošová, Control of a heat exchanger using Takagi-Sugeno fuzzy model. IEEE Xplore Digital Library, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2014.6843684>.
- [4] Z. Zidane, M. Lafkih, M. Ramzi, Adaptive Generalized Predictive Control of a heat exchanger pilot plant. IEEE Xplore Digital Library, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/icmcs.2011.5945715>.
- [5] D. Kajzr, M. Diblík, L. Beran, L. Hubka, The possibilities for design and implementation of multivariate control for a level control in a double tank process. IEEE Xplore Digital Library, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/carpathiancc.2016.7501112>.
- [6] J. Nandong, Synthesis of multivariable PID controllers via inter-communicative decentralized multi-scale control for TITO processes. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ascc.2015.7244403>.
- [7] C. Fu, W. Tan, Partially decentralized control based on IMC for a benchmark boiler. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ccdc.2015.7161662>.
- [8] M. Sirsat, B. Parvat, C. Kadu, Design of decentralized PI controller for two-input, two-output processes. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/icesa.2015.7503390>.
- [9] S. Datta, U. Nath, C. Dey, Design and implementation of decentralized IMC-PI controllers for real time coupled tank process. IEEE Xplore Digital Library, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2015.1613>.

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE INTENSIDAD LUMINOSA PARA UNA MÁQUINA DE INSOLACIÓN

Design of controller for a machine light intensity insolation

Javier Eduardo Martínez Baquero¹, Elías Parrado S.², Luis E. Morales Suarez³

¹ Universidad de los Llanos – Unillanos, Escuela de Ingeniería, Grupo Investigación GITECX, Colombia.
Email: jmartinez@unillanos.edu.co

² Universidad de los Llanos-Unillanos, Especialista en Instrumentación y Control Industrial, Colombia.
Email: eliasparradosandoval@yahoo.com.mx

³ Universidad de los Llanos-Unillanos Especialista en Instrumentación y Control Industrial, Colombia.
Email: enriquemorales.s@hotmail.com

(Recibido Agosto 22 de 2016 y aceptado Octubre 21 de 2016)

Resumen

El presente documento muestra el diseño de un controlador para una máquina de insolación usada en procesos de fotocurado. Para ello se inició el desarrollo realizando una revisión previa minuciosa a la máquina de insolación existente, y a los procedimientos que se deben llevar a cabo en el laboratorio de estampados, con el fin de comprender el proceso de fotocurado, evaluando las posibilidades de mejora de los equipos en uso. El diseño propuesto para el controlador es un PI, el cual se realizó con herramientas de simulación de Matlab, dando prioridad al tiempo de exposición en el proceso de fotocurado el cual debe ser el mismo para cualquier tipo de tela o malla del bastidor, lo cual permite que la máquina de insolación no requiera ser operada por personal altamente calificado o competente en este arte.

Palabras clave: Serigrafía, insolación, control PI, diseño

Abstract

This paper presents a design for a insolation machine controller used in curing processes. This development began conducting a thorough prior review to the actual insolation machine and the procedures to be carried out in the printing laboratory, in order to understand the process of curing, assessing the possibilities for improving the equipment in use. The proposed controller design is a PID, which was made with matlab simulation tools, giving priority to the exposure time in the process of curing which must be the same for any type of fabric or mesh frame. This will allow the insolation machine does not require to be operated by highly qualified and competent staff in this art.

Key words: Serigraphy, insolation, PI control, design.

1. INTRODUCCIÓN

En aquellas empresas donde se realiza el proceso de fabricación de negativos de bastidores que van a ser utilizados en procesos de estampados, el éxito de esta labor depende en gran medida de la experiencia del operador del laboratorio, ya que este proceso al ser tan artesanal requiere de un conocimiento de las emulsiones y del uso de las máquinas de insolación, la cuales al ser de fabricación “casera” presentan demasiadas interferencias

al sistema, siendo estos los factores determinantes para que la calidad de los estampados varíe en su calidad.

Este proceso de estampado, llamado serigrafía, del griego Serikós “seda” y Graphé “escribir”, es una técnica de impresión que consiste en copiar imágenes, dibujos o texto sobre cualquier material, transfiriendo una tinta a través de una malla de seda, metal o nailon tensado en un marco, el paso de la tinta se bloquea en las áreas donde no habrá imagen mediante una emulsión o barniz, quedando libre la zona donde pasará la tinta. Duran-

Cómo citar este artículo:

Cómo citar este artículo: J.E. Martínez Baquero, E. Parrado & L.E. Morales-Suarez, “Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación,” *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 26-36, Enero, 2017.

te esta actividad, el proceso de insolación consiste en emulsionar con una resina fotosensible los bastidores, que son las pantallas enteladas con marcos en madera donde quedara grabado el diseño y servirá como elemento principal de plantilla para estampar, la emulsión fotosensible es sometida a la exposición de una potente fuente luminosa, cuya luz atraviesa los espacios que ha dejado al descubierto el diseño o positivo endureciendo la sustancia fotosensible.

Debido a lo anterior, se presenta a continuación el diseño del controlador de la intensidad luminosa para una máquina de insolación, desarrollada por estudiantes y docentes de la Especialización en Instrumentación y Control de la Universidad de los Llanos, con el cual se desean obtener mejores resultados en los procesos de estampados.

De esta manera, con el presente proyecto se desea incursionar aún más en el campo de la investigación, para aumentar la competitividad y así mejorar lo dicho por [1], quien argumenta que en general, la falta de competitividad en los sectores productivos de los países en vías de desarrollo, según los expertos en las sociedades latinoamericanas, tiene raíces profundas en la carencia de una cultura de la investigación, que se explica por la debilidad en este ámbito del sistema educativo y por el desconocimiento de su historia por la sociedad en esas naciones.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La intensidad de la luz juega un papel muy importante a la hora de realizar el proceso de fotocurado del bastidor en una máquina de insolación, definiendo la dureza de la emulsión diazoica en las zonas donde se desea que al lavar el bastidor se caiga la emulsión resultando el dibujo del diseño. Cuando se realiza un diseño de policromía se necesitan varios bastidores para formar la imagen del estampado, si el bastidor en el proceso de fotocurado falla en la definición del diseño en la emulsión, al sobreponer las imágenes resulta una figura borrosa.

Este problema se presenta con frecuencia, y conlleva a pérdidas en la producción debido al desperdicio de materia prima, principalmente porque el tiempo de exposición a la luz no es suficiente o no tiene la potencia adecuada que permita un resultado acorde con el diseño propuesto para el estampado.

En la figura 1 se muestra un error en la definición del proceso de fotocurado.



Figura 1. Error en definición proceso defotocurado

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La automatización en la industria, hasta los años 70, se ejecutaba exclusivamente con relés, conocida como una lógica cableada, pero a partir de estos años, la sistemas de automatización (Controladores Lógico Programables - PLC) interrumpieron ese camino y se trasladó a la lógica programada. Las primeras versiones y modelos de PLC eran costosos, difíciles de programar, tenían relativamente poca memoria y casi ningún periférico.

Las aplicaciones de automatización modernas deben ser capaces de adaptarse a los cambios en los requerimientos de producción. Dado que la mayoría de las aplicaciones de fabricación son distribuidas, puede ser necesario reconfigurar las operaciones que ejecutan varios dispositivos del sistema de forma sincronizada. Desafortunadamente, reconfigurar este tipo de aplicaciones es una tarea compleja para los desarrolladores de aplicaciones, especialmente cuando las operaciones se deben ejecutar en determinados instantes de tiempo o los recursos son escasos. [2].

Un sistema automatizado está conformado por elementos o instrumentos, lo cuales son utilizados para medir variables físicas, ejercer acciones de control y transmitir señales. En todos los procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes. [3].

El diccionario de la Real Academia Española define la Automática como la disciplina que trata de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea física o mental previamente programada. [4].

Los sistemas de control realizan estas operaciones de forma automática, estabilizando la variable del proceso (salida) en un valor deseado (set point). Gracias al uso de los controladores se han mejorado muchos procesos de producción, incrementando la calidad de productos en la industria.

En la ecuación (1) se representa un controlador PID

$$PID = Kp(1 + \frac{1}{TiS} + TdS) \quad (1)$$

Este controlador establece su característica de desempeño según la ecuación (2), como la señal en el dominio de tiempo llamada señal de control o señal de mando, indicando allí las constantes que lo rigen.

$$u(t) = Kpe(t) + \frac{Kp}{Ti} \int e(t)dt + KpTd \frac{d}{dt} e(t) \quad (2)$$

Para la máquina de insolación se ha optado por un controlador PI, considerando que la acción derivativa no se requiere debido a que el sobrepaso no será significativo. La ecuación (3) presenta el controlador PI.

$$PI = Kp(1 + \frac{1}{TiS}) \quad (3)$$

Una vez identificado el controlador es importante mencionar que existen diversos métodos de diseño, entre ellos las reglas de Sintonización Ziegler Nichols, la cual se basa en la respuesta del sistema en lazo abierto ante una señal escalón. [5].

Para este proyecto se hace uso del primer método de Ziegler Nichols ya que la planta no presenta integradores. Para el cálculo de las constantes se toma como base la tabla 1.

Tabla 1. Sintonización de Controladores PID

| Tipo | Kp | Ti | Td |
|------|----------|-------|------|
| P | T/L | INF | 0 |
| PI | 0.9(T/L) | L/0.3 | 0 |
| PID | 1.2(T/L) | 2L | 0.5L |

Fuente: Tomado del libro Ingeniería de Control Moderna.

El sistema de control de intensidad luminosa para la máquina de insolación estará determinado por el diagrama de bloques mostrado en la figura 2, donde se establecen los elementos que allí intervienen.

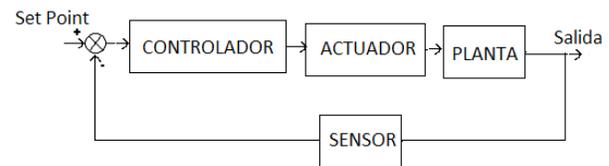


Figura 2. Diagrama de bloques sistema de control.

El empleo de los sensores en la tecnología, tanto en el ámbito industrial como doméstico, se ha vuelto usual la medición de magnitudes mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas en sectores como industrias automatizadas, la robótica, la ingeniería experimental, el ahorro energético, el control ambiental, automóviles, electrodomésticos, computadoras, son tareas que serían impensables sin la aplicación de los sensores. [6].

Una vez establecido el tipo de controlador que será empleado para el sistema de control, se procede a su diseño, indicando que fue necesario la implementación de un prototipo de máquina de insolación diseñado con las dimensiones requeridas para los bastidores ya existentes. Los materiales utilizados para el prototipo fue madera, haciéndose un embudo en lámina galvanizada y ubicando un reflector en su parte inferior del embudo acondicionándose con papel de aluminio adhesivo para mejorar la proyección y dirección del haz de luz.

Con respecto al sensor de luz se hará uso de celdas fotovoltaicas por su eficiencia y facilidad de instalación, decidiendo la implementación de tecnología LED (Figura 3), además buscando bajo consumo de energía y reducir costos en la lámpara.

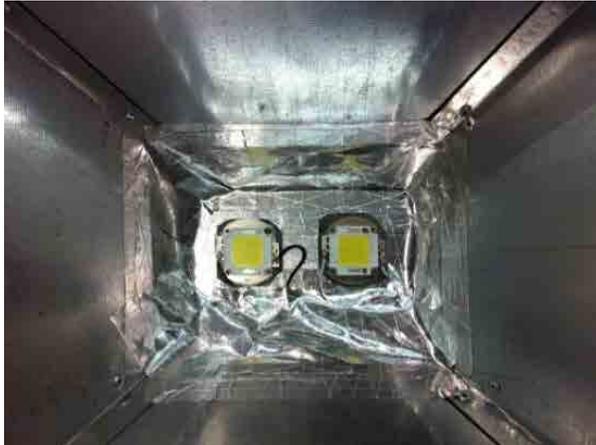


Figura 3. Lámparas LED instaladas en prototipo

Dichas celdas fotovoltaicas generan un voltaje DC en sus terminales proporcional a la luz incidente.

Posteriormente, con el fin de definir la variación del valor del voltaje de la celda fotovoltaica a la exposición de la luz en el área de influencia del haz, se procede a realizar mediciones para observar estos cambios. Para ello se dibujó una cuadrícula de nueve por siete secciones en el vidrio de la máquina de insolación fabricada y se tomaron los datos registrados a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Voltajes obtenidos por el sensor en cada sección del vidrio.

| | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4,488 | 4,518 | 4,555 | 4,595 | 4,637 | 4,620 | 4,542 | 4,548 | 4,477 |
| 4,470 | 4,550 | 4,589 | 4,635 | 4,682 | 4,654 | 4,602 | 4,572 | 4,465 |
| 4,513 | 4,599 | 4,636 | 4,692 | 4,760 | 4,721 | 4,656 | 4,610 | 4,498 |
| 4,559 | 4,634 | 4,670 | 4,741 | 4,803 | 4,771 | 4,702 | 4,660 | 4,541 |
| 4,534 | 4,616 | 4,640 | 4,692 | 4,755 | 4,717 | 4,653 | 4,618 | 4,456 |
| 4,480 | 4,583 | 4,589 | 4,626 | 4,676 | 4,642 | 4,590 | 4,566 | 4,459 |
| 4,463 | 4,505 | 4,568 | 4,631 | 4,667 | 4,650 | 4,616 | 4,539 | 4,488 |

Estos datos permiten determinar que la celda fotovoltaica captura el haz de luz en los diferentes puntos del área de la máquina con un voltaje adecuado para su acondicionamiento.

Dicho circuito de acondicionamiento del sensor (Figura 4), el cual se conecta a la entrada de una tarjeta Arduino Uno, para así proceder a la toma de datos e iniciar el proceso de diseño del controlador.

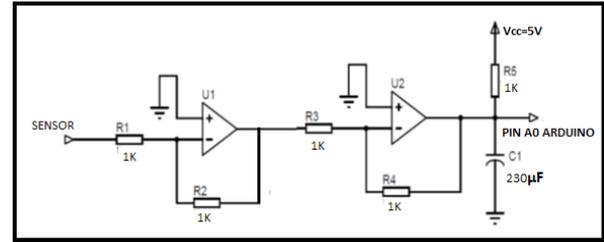


Figura 4. Circuito acondicionador del sensor.

Con el circuito de acondicionamiento mostrado en la figura 4 se obtiene la gráfica en Matlab que representa la variación del sensor con respecto a la entrada generada. La señal de salida comprendida entre un valor de 0 voltios a 5 voltios, con una frecuencia de oscilación de 1KHz. La señal generada en en la adquisición de datos en Matlab inicia con un valor de 0 voltios, con incrementos de 0.05 voltios hasta llegar al valor máximo de 5 voltios, con un tiempo de muestreo en la adquisición de 0.02 segundos.

En la Figura 5 se aprecia la respuesta del sensor graficada en Matlab con el código de adquisición de datos.

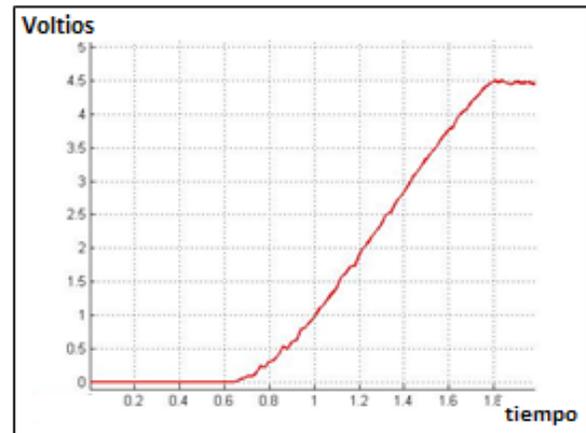


Figura 5. Grafica de la respuesta del sensor

A continuación se ingresan estos datos adquiridos en Matlab con la función Ident, definiendo el intervalo de muestreo y el tiempo de inicio, como se observa en la figura 6, de esta manera se procesan los datos, generando la caracterización de la planta.

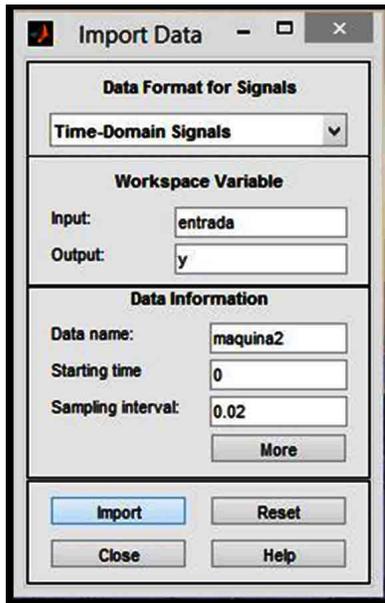


Figura 6. Datos importados del Workspace de Matlab

En la función `Ident` se aprecia los datos adquiridos para luego ser procesados y generar la ecuación de transferencia de la máquina. Figura 7.

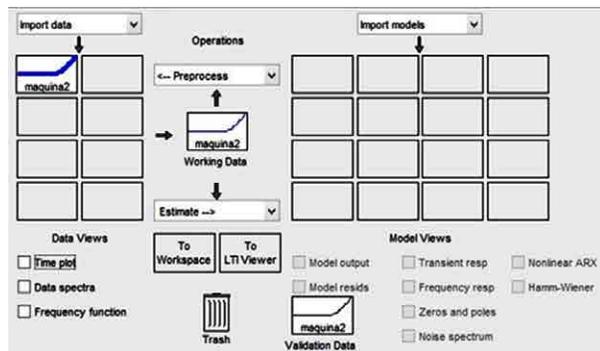


Figura 7. Función `Ident` de matlab

Se procede a evaluar los datos de entrada. La descripción matemática de un polo real y retardo se obtiene con una aproximación del 90% utilizando la siguiente definición en la herramienta `Ident` de Matlab. Ver Figura 8.

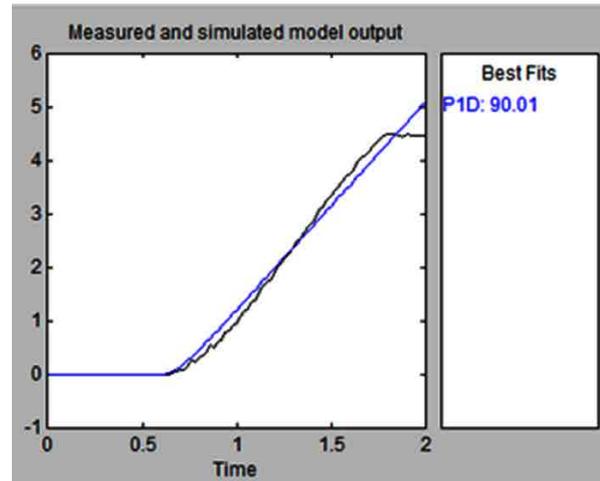


Figura 8. Grafica de estimación P1D.

Estos datos se exportan al workspace de Matlab y se obtiene la función de transferencia de la máquina de insolación, como se aprecia en la Figura 9.

La expresión allí encontrada corresponde a un sistema de primer orden, con retardo de transporte, como lo indica la ecuación (4), cuya constante de tiempo es de 0.6 segundos. A partir de esta se precede a realizar el análisis con el comando `pade` (aproximación del retardo de transporte) de Matlab para definir la ecuación de la función de transferencia de la máquina en el tiempo continuo. Este resultado se presenta en la figura 10.

$$PLANTA = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (4)$$

```
>> tf(P1D)

ans =

From input "u1" to output "y1":
      1.555
exp(-0.6*s) * -----
      0.0822 s + 1

Name: P1D
Continuous-time transfer function.
```

Figura 9. Command window de Matlab de la respuesta P1D.

```
>> pade(segun)

ans =

From input "u1" to output "y1":
      -1.555 s + 5.183
-----
      0.0822 s^2 + 1.274 s + 3.333

Name: P1D
Continuous-time transfer function.
```

Figura 10. Función de transferencia aproximada con comando pade.

Puede notarse que la función de transferencia allí encontrada corresponde a un sistema que presenta un cero y dos polos. A continuación se evalúa dicha función de transferencia con el comando rlocus, cuyo resultado se observa en la figura 11.

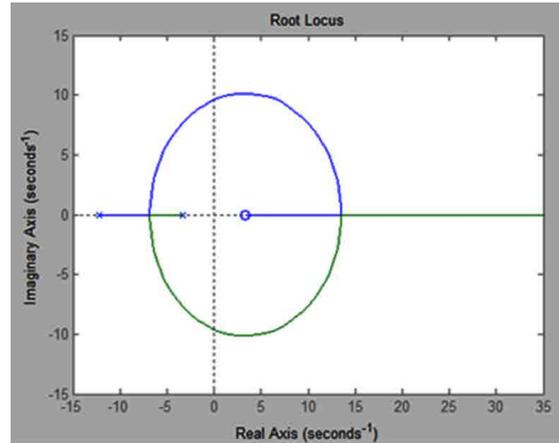


Figura 11. Lugar geométrico de las raíces de P1D.

Como se puede apreciar, la ubicación de los polos que se encuentran en el semiplano negativo del plano indican una respuesta estable, lo cual garantiza que el sistema logrará llevar la señal de salida del sistema al valor deseado, el cual se establecerá en el set point de la máquina de insolación.

Habiendo definido la función de transferencia de la planta, se procede a calcular un controlador con la herramienta PIDtool de Matlab, encontrando las constantes del controlador así:

```
      1
Kp + Ki * ---
      s

with Kp = 0.0988, Ki = 0.511

Continuous-time PI controller in parallel form.
```

Figura 12. Constantes controlador PI

Con la herramienta Sisotool de Matlab se puede observar el lugar geométrico de las raíces de la ecuación P1D pade con el controlador PI, como se muestra en la figura 13.

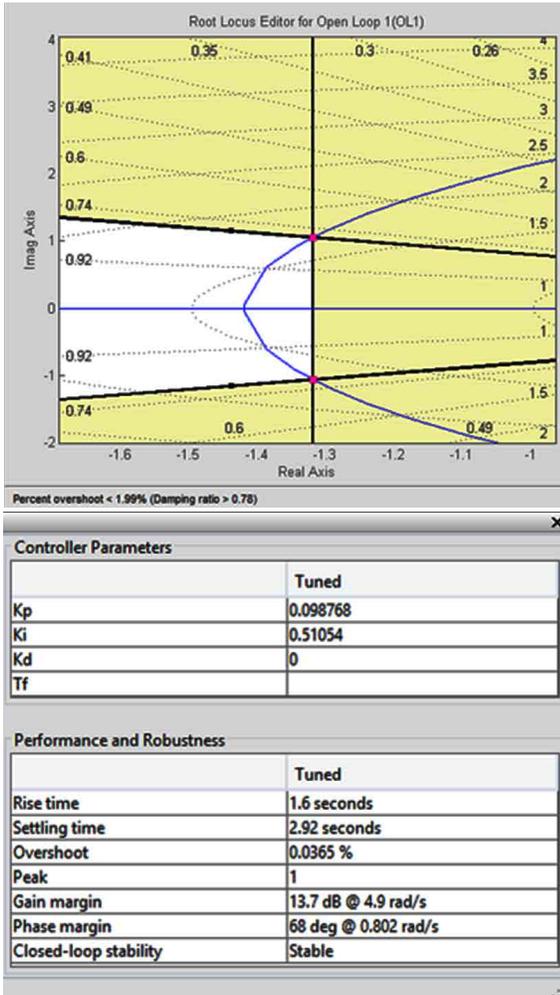


Figura 13. Lugar geométrico de las raíces de P1D. Requerimientos de diseño Sisotool de Matlab.

4. RESULTADOS

Hasta el momento se han obtenido resultados satisfactorios en el proceso de diseño, con las herramientas que ofrece Matlab, ahora se presentan los resultados que de ellos derivan, especialmente con respecto a las curvas de respuesta de controlador.

El sistema hallado se evalúa ahora con una señal escalón y luego una señal impulso, las cuales permiten el análisis de la estabilidad del sistema en el dominio del tiempo, siendo esta una de las características más usuales en un diseño de controladores. Las figuras 14 y 15 muestran la respuesta del sistema ante una señal escalón y ante una señal impulso, respectivamente.

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario. La respuesta transitoria se refiere a la que va del estado inicial al estado final. Por respuesta en estado estacionario se entiende la manera como se comporta la salida del sistema conforme t tiende a infinito. [7].

Por tanto, la respuesta del sistema $c(t)$ se puede escribir como se muestra en la ecuación 5.

$$C(t) = C_{tr} + C_{ss}(t) \quad (5)$$

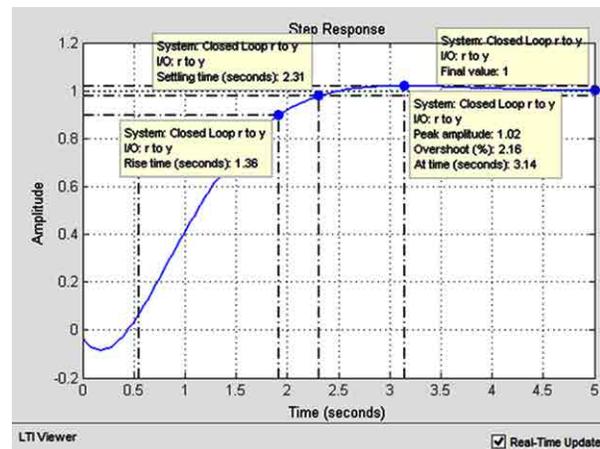


Figura 14. Respuesta escalón del controlador P1D.

Como se puede apreciar, la respuesta en el dominio del tiempo ante una señal escalón muestra la estabilidad del controlador diseñado, en un tiempo bajo, aproximadamente 3 segundos, además el sobrepaso máximo es de tan solo 2.16%,

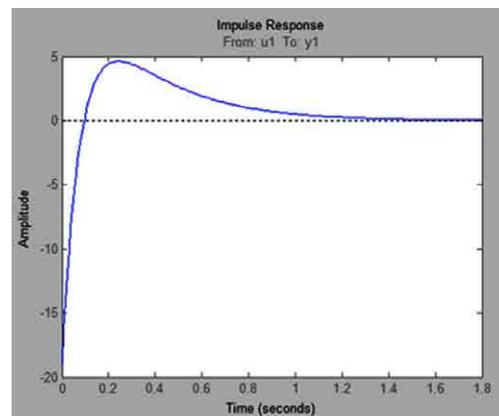


Figura 15. Respuesta impulso del controlador P1D.

De igual manera la respuesta del sistema ante una función impulso presenta una respuesta rápida, logrando estabilizarse en 1.4 segundos, lo cual permite concluir que los valores encontrados para las constantes del controlador actúan de manera adecuada.

Una vez se ha verificado la estabilidad del sistema, se analiza la ecuación con la herramienta PIDtool de Matlab para encontrar un controlador PID.

Es importante el uso de la herramienta Sisotool de Matlab para verificar mediante el lugar geométrico de las raíces la ecuación P1D pade con el controlador y los resultados del diseño, como se muestra en la figura 15, donde se aprecia un sobrepaso menor al 4%, lo cual representa una respuesta bastante importante para el controlador.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados presentados hasta este momento representan un desempeño adecuado para la máquina de insolación; ahora se procede a realizar un análisis de ellos, como lo es en la gran mayoría de los casos la respuesta paso del sistema, pero esta vez los datos obtenidos del controlador y la función de transferencia son llevados a Simulink de Matlab, como se muestra en la figura 16. Allí también se evaluará con una respuesta paso, teniendo así en la simulación una respuesta más real del sistema. La respuesta que se obtiene a la salida del osciloscopio se observa a continuación en la figura 17, en la cual la línea de color amarillo representa la salida del contro-

lador y la línea de color morado representa la salida de la planta.

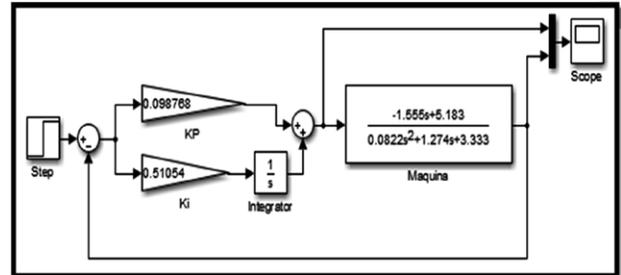


Figura 16. Simulación en Simulink de Matlab

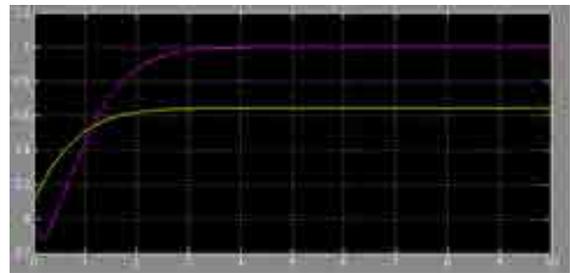


Figura 17. Salida del controlador y la planta

A partir de este se implementan los datos obtenidos del controlador y la función de transferencia de P1D en Simulink de Matlab, llevándolo al diagrama del controlador presentado en la figura 18 para implementarlo en la tarjeta Arduino Uno.

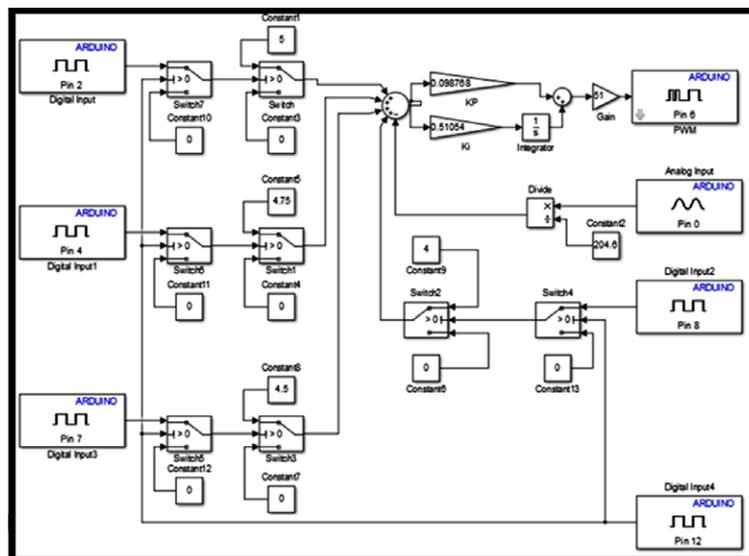


Figura 18. Programa implementado en tarjeta Arduino Uno.

Puede concluirse dentro del presente análisis que el programa elaborado en Simulink de Matlab mediante el diagrama en bloque es adecuado, la tarjeta Arduino lo reconoce adecuadamente, por lo tanto se procede a generar el código en lenguaje Arduino utilizando la herramienta de PID que incorpora dicho lenguaje. A continuación se describe el programa realizado en Arduino.

```
Código Arduino
#include <PID_v1.h>
int a=0,b=0,c=0,d=0;
int seda120,seda77,seda43,seda13;
double Setpoint, Input, Output;
PID
myPID(&Input,&Output,&Setpoint,0.098768,0.51054,0,
DIRECT);
void setup() {
  pinMode(6,OUTPUT); //define como salida
  pinMode(A0,INPUT); //define como entrada
  pinMode(2,INPUT); //interruptor seda
  pinMode(4,INPUT); //interruptor seda
  pinMode(7,INPUT); //interruptor seda
  pinMode(8,INPUT); //interruptor seda
  Serial.begin(9600); //inicia comunicacion serial
  Input=analogRead(A0); //lectura del puerto analogo
  A0
  myPID.SetSampleTime(10);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(0,255);
}
void loop() {
  seda13=digitalRead(2);
  seda43=digitalRead(4);
  seda77=digitalRead(7);
  seda120=digitalRead(8);
  if (seda120>a)
  {
  Setpoint=940;
  Input=analogRead(A0);
  myPID.Compute();
  analogWrite(6,Output);
  }
  else {analogWrite(6,0);}
  if (seda77>b)
  {
  Setpoint=950;
  Input=analogRead(A0);
  myPID.Compute();
  analogWrite(6,Output);
  }
```

```
}
if (seda43>c)
{
Setpoint=960;
Input=analogRead(A0);
myPID.Compute();
analogWrite(6,Output);
}
if (seda13>d)
{
Setpoint=1000;
Input=analogRead(A0);
myPID.Compute();
analogWrite(6,Output);
}
}
```

Como punto importante del sistema propuesto se indican las lámparas planteadas para la máquina, las cuales permiten una mayor duración en horas de funcionamiento gracias a la tecnología LED. En la figura 19, se muestra la diferencia en la luz generada por la máquina propuesta (luz LED blanca) y la máquina actual (luz amarilla), siendo factor preponderante la reducción en el consumo de energía para la máquina de insolación propuesta,

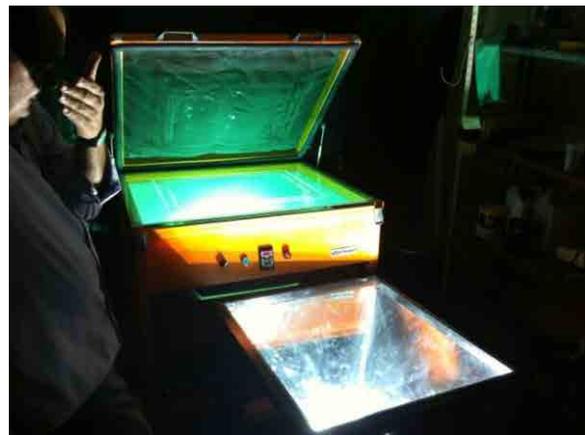


Figura 19. Prototipo máquina de insolación con tecnología LED

En la figura 20 se presenta el resultado del proceso de fotocurado con la máquina de insolación diseñada, en la cual se observa un buen resultado en la definición logrando eliminar los resultados de definición presentados con máquina actual.



Figura 20. Positivo hecho en prototipo máquina de insolación con tecnología LED

CONCLUSIONES

La máquina de insolación propuesta con el controlador PI permite establecer un mejor diseño en el proceso de fotocurado eliminando los errores de definición, logrando una imagen clara y de mejor calidad.

Las celdas fotovoltaicas permiten la captación de la intensidad de luz proveniente de las lámparas LED de forma adecuada, entregando una señal de voltaje DC de fácil acondicionamiento.

Con las lámparas LED instaladas se logró un mejor desempeño en la máquina de insolación, permitiendo el proceso de fotocurado en el mismo tiempo, sin importar el tipo de seda, además se redujo el consumo de energía.

La tarjeta Arduino uno presenta un buen funcionamiento en el control del proceso, pero para ajustes bajos de la referencia se requiere un procesamiento mayor.

La máquina de insolación propuesta permite una mayor facilidad en su uso, no requiriendo un personal cualificado para su puesta en funcionamiento.

Los valores de las constantes obtenidas para el controlador permiten establecer un diseño adecuado, ratificado

en las respuestas del sistema a partir de las respuestas obtenidas de Matlab.

Se logró una buena caracterización de la planta con un valor del 90% de la curva de respuesta del sensor siendo este muy cercano a la respuesta original dando como resultado una función de transferencia muy similar a la real.

Si se desea implementar un sistema más robusto de control se aconseja la utilización de una tarjeta de mayor procesamiento para mejorar el tiempo de muestreo y respuesta al actuador.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Bernal Torres, "Desarrollo de la Investigación y reporte del informe final," in *Metodología de la Investigación*, O. Fernández Palma, Pearson Educación de Colombia Ltda. 3ª ed. Colombia, 2010, pp. 234-258.
- [2] M. Gonzalez, A. Noguero, F. Pérez, and I. Calvo, "Reconfigurando Aplicaciones de Automatización Industrial Con FTT-MA," in *XXXIV Jornadas de Automática*, 2013, pp. 767-72.
- [3] A. Creus, A. "Medidas de Caudal," in *Instrumentación Industrial*, Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 8ª ed. México, 2011, pp. 195-220.
- [4] R. Piedrafita M., *Ingeniería de la Automatización Industrial*, Alfaomega, 2da Edición ampliada y actualizada, México, 2010, pp. 59-80.
- [5] V. Ruíz, "Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores". *Revista Ingeniería*, vol 12, n° 2, pp. 21-36, 2011. DOI: <https://doi.org/10.15517/ring.v13i1-2.617>
- [6] A. R. Pallas, *Sensores y Acondicionadores de Señal*, Marcombo, S.A., 4ª Ed., México: Marcombo, 2005, pp. 40-120.
- [7] K. Ogata, "Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria" in *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall, 5ª ed., México, 2010, pp. 170-190.
- [8] M.A. Pérez García, *Instrumentación Electrónica*, Garceta grupo editorial, 2012.
- [9] G. M. González, "Controlador de lámparas LED con ajuste de la intensidad luminosa," Tesis fin de carrera, Universidad de Cantabria, Jul. 2013.

- [10] R. Hernández G. "Modos de control y diseño de controladores", in *Introducción a los Sistemas de Control, Conceptos, Aplicación y simulación con*
- [11] J. Acedo Sánchez. "Elementos Finales de Control," in *Instrumentación y Control Básico de Procesos*, Ediciones Díaz de Santos: España, 2006, pp. 353-370.
- [12] B.C. Kuo, "Diseño de sistemas de Control," in *Sistema de Control Automático*, Prentice Hall, 7^{ma} ed., México, 2010, pp. 665-714.
- [13] A. Morales, S., *Instrumentación Básica de Procesos Industriales*, International Society of Automation (ISA), México, 2007, pp. 20-40.
- [14] The MathWorks. MATLAB Support Package for Arduino Hardware User Guide R2014a [online], 2014. Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduinoio/examples/getting-started-with-matlab-support-package-for-arduino-hardware.html>

COLOMBIA: TERRITORIO DE INVERSIÓN EN FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA RENOVABLE PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Colombia: Territory for investment in non-conventional renewable energy to electric generation

Wiston Ñustes¹, Sergio Rivera²

¹Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Eléctrica, Colombia.

Email: wanustesc@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, Area de Sistemas de Potencia, Smart Grids y Máquinas Eléctricas, Colombia. Email: srriverar@unal.edu.co

(Recibido julio 29 de 2016 y aceptado septiembre 14 de 2016)

Resumen

El presente documento corresponde a un Artículo de Reflexión que muestra los diferentes resultados de investigación sobre el panorama del sector eléctrico actual en Colombia y como esto ha llevado a contemplar la inclusión de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR) en un corto y mediano plazo. Teniendo como previa discusión la evolución de la industria eléctrica colombiana en las últimas décadas, la problemática actual y la visión de los diferentes agentes del sector eléctrico. Finalmente se presenta las fuentes de financiamiento que se tienen Nacional e Internacionalmente para llevar a cabo proyectos de Generación Distribuida con Fuentes no Convencionales de Energía Renovable en Colombia.

Palabras clave: Energía Renovable, Fuentes de Financiación, Generación Eléctrica, Sistema de Potencia Colombiano.

Abstract

This document corresponds to a reflection paper showing different research results on the picture of the current electricity sector in Colombia and how it has led to contemplate the inclusion of Non-Conventional Renewable Energy (FNCR) in a short and medium term. First, a discussion of the evolution of the electricity industry in Colombia at recent decades is presented, and the current problems and vision of the different agents of the electricity sector are developed. Finally, financing sources (nationally and internationally) needed to carry out projects of Non-Conventional Sources of Distributed Generation and Renewable Energy is presented.

Key words: Renewable Energy, Financing sources, Power Generation, Colombian Power System.

1. INTRODUCCIÓN: EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA COLOMBIANA

La evolución de la industria eléctrica en Colombia desde los años 80 hasta el presente fue marcada por los siguientes hitos principales [1-3]:

(i) Evolución de la matriz de generación pasando de un parque energético basado en generación mediante el uso de combustibles fósiles (década de los 80) a un parque actual de energía hidroeléctrica (68%) y energía térmica (28%), Figura 1 (datos provenientes de [4-8]).

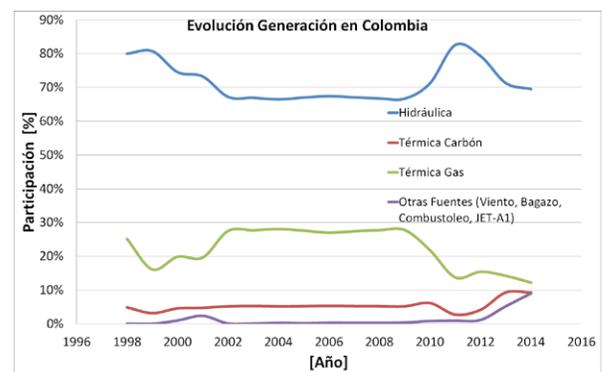


Figura 1. Evolución de la Generación en Colombia.

Cómo citar este artículo:

W. Ñustes, & S. Rivera, "Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica," *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 37-48, Enero, 2017

(ii) Evolución de la calidad del servicio técnico y la calidad del producto técnico, asociado al cambio de tecnología [9-11]. Muestra de ello, por ejemplo, es la mejora en la calidad del servicio técnico referente a número de fallas y duración de las fallas, SAIDI y SAIFI, respectivamente, donde se observa las tendencias mostradas en las figuras 2 y 3 (datos provenientes de [9,10,12]. En ellas se presenta para distintos tipos de circuitos de media tensión dados por un grupo determinado (grupo 1 a grupo 4) dependiendo de la cantidad de usuarios conectados [10].

(iii) Evolución de la demanda y de la oferta, donde por ejemplo la tasa anual de crecimiento promedio de la demanda en los últimos 10 años fue de 3.6%, de acuerdo a la Figura 4 (datos provenientes de [4-6]).

(iv) Evolución del esquema institucional del sector eléctrico desde lo sucedido a inicios de la década de los 90 cuando la deuda del sector se convirtiera en el principal problema macroeconómico del país [13-14]. Este llegó a representar el 40% del endeudamiento externo [13].

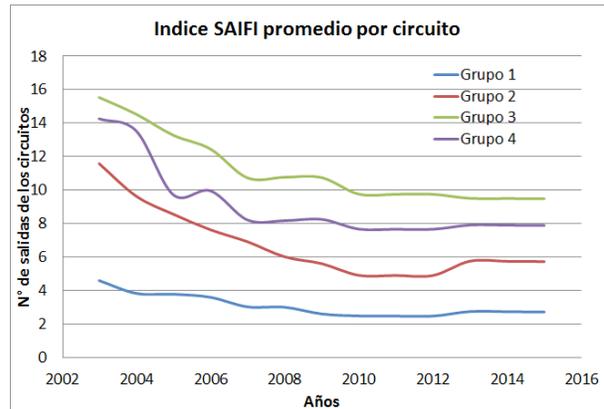


Figura 3. SAIFI promedio por circuito.

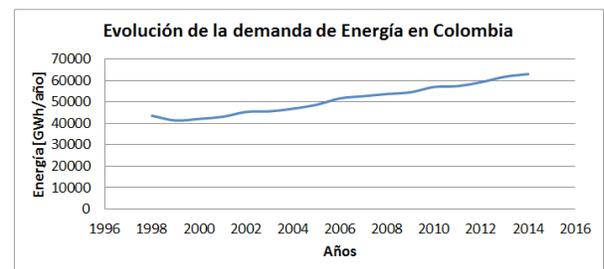


Figura 4. Evolución de la demanda de energía eléctrica en Colombia.

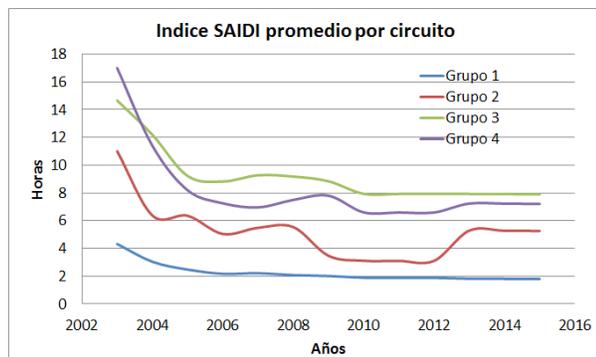


Figura 2. SAIDI promedio por circuito.

El suceso del racionamiento energético que se extendió entre el 2 de marzo de 1992 y el 1 de abril de 1993 fue el catalizador de un proceso de reforma que reestructuraría por completo el sistema eléctrico. Las leyes 142 y 143 de servicios públicos domiciliarios [15], ley eléctrica de 1994, permitieron definir el papel del Estado, separando las actividades de regulación y control de las acciones propiamente empresariales.

Adicionalmente, durante la evolución del sector eléctrico colombiano se crearon entidades soporte como [13,16]:

-Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Encargada de establecer requerimientos energéticos de la población y la manera de satisfacerlos; de elaborar y actualizar el Plan Minero Nacional, el plan Energético Nacional y el Plan Indicativo de Expansión del sector Eléctrico.

-Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, la cual expide las reglas para asegurar la disponibilidad de una oferta energética eficiente, propiciar la competencia, impedir abusos de las entidades prestadoras del servicio y buscar la liberación gradual del mercado eléctrico hacia la libre competencia.

-Superintendencia de Servicios Públicos – SSPD, controla que las empresas que prestan los servicios públicos cumplan con las leyes, las regulaciones y demás actos administrativos que los rigen.

-Centro Nacional de Despacho – CND, es el responsable de realizar las siguientes actividades para la operación integrada de los recursos de del sistema de interconexión nacional (generación, interconexión y transmisión): planeación, supervisión y control.

-Centro Nacional de Operación – CON, encargado de convenir los aspectos técnicos de tal manera que garantiza la operación del sistema de interconexión nacional de una manera segura, confiable y económica.

Finalmente, la prestación y asistencia del servicio de energía eléctrica se definió en cuatro actividades [13,16]: Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización. Las cuales se combinan de la siguiente manera: Generación y Comercialización, Transmisión, Distribución y Comercialización, y Comercialización exclusiva [16].

2. PROBLEMÁTICA ACTUAL

Colombia posee una capacidad instalada de aproximadamente 16.000 MW de los cuales aproximadamente el 71% es en parte por recursos renovables principalmente energía generada por centrales hidroeléctricas [4,5,17]. La demanda de energía

en el 2015 fue de aproximadamente 65.300 GWh con una carga pico de 10.000 MW aproximadamente [17].

Para cubrir esta demanda, la participación de fuentes renovables no convencionales es cercana al 3% sumado al 4% proveniente de la generación hidroeléctrica de capacidad menor que 20 MW, para un total de aproximadamente un 7%, lo cual es una participación muy pequeña [18]. Por ejemplo, los vientos en Colombia son catalogados como una fuente renovable de alto potencial energético, sin embargo, no se aprovecha ni el 0.4% de su potencial teórico [4]. La matriz de generación eléctrica actual posiciona al país con una alta tasa de vulnerabilidad del sector eléctrico debido a diferentes factores. Por ejemplo, debido al fenómeno de “El Niño” se ha disminuido recientemente el aporte de la generación hidroeléctrica del país en un 25%. Esta disminución está siendo cubierta por generación térmica que en algunos casos es ineficiente por sus costos variables. Es decir, a principios del 2016 la proporción de generación es del 53% hidroeléctrica y 43% térmica (carbón, gas y líquidos). La disminución de generación hidroeléctrica ha implicado que antes de ‘El Niño’ un MWh costaba aproximadamente USD 90, con el fenómeno pasó a cerca de USD 140 [19]. Adicionalmente, los grandes consumidores son los que enfrentan este aumento de precio debido a que compran en el mercado mayorista, con un sobre costo para la demanda cercano a los USD 294 millones.

Adicionalmente, el alto costo de los combustibles líquidos y la escasez de gas, han llevado a que algunas generadoras dejen de entregar energía al sistema. Lo cual hace que financieramente sea inviable mantener la producción [19]. Las medidas de mitigación por parte del Gobierno Nacional para estas plantas que están trabajando sin cubrir sus costos son el aumento en la tarifa al usuario, además de las sanciones por el desperdicio energético y las restricciones de exportación de energía a los países vecinos [19].

Por otra parte, en la evolución del sector eléctrico colombiano no se han incorporado ciertas zonas del país. En Colombia aproximadamente el 50 % del territorio nacional corresponde a las Zonas No Interconectadas (ZNI) al Sistema Interconectado Nacional (SIN) [18,20, 21]. A pesar de la limitación en recursos económicos, las ZNI del país cuentan con una gran viabilidad de generación de energía eléctrica mediante recursos renovables no convencionales [4,21-22].

El contexto descrito revela una gran debilidad en la estructura actual de la matriz eléctrica colombiana y por ende de la confiabilidad del sistema en cuanto al suministro eléctrico, debido a la alta incertidumbre del recurso hidroeléctrico y su vulnerabilidad al “efecto del Niño”. Esta realidad es una oportunidad de negocio para diferentes actores que quieran invertir en generación distribuida, redes inteligentes, microredes y parques de generación renovable no tradicionales. De hecho, con mayor penetración de estas tecnologías podrían afrontarse mejor las problemáticas señaladas [17]: complementariedad de distintas fuentes de generación renovables no tradicionales con las tradicionales hidroeléctricas, reducir la vulnerabilidad de los grandes consumidores a las fluctuaciones de los precios y suministro de menores costos y mayor confiabilidad en las ZNI.

3. VISION DE AGENTES PARTICIPANTES EN EL SISTEMA DE POTENCIA COLOMBIANO

En aras de que el sistema de potencia colombiano sea más robusto ante las problemáticas mencionadas, diferentes agentes actores ((i) Distribuidoras, (ii) Estado (iii) Demanda y (iv) Generadores) están de acuerdo en que deberían darse las inversiones señaladas [17], dado también la reducción en los costos de estas nuevas tecnologías. Para este trabajo de investigación se entrevistaron (mediante reuniones y correos electrónicos) los diferentes agentes del mercado, académicos y profesionales relacionados, como también a ASOCODIS (Asociación Colombiana de Distribuidores de Energía Eléctrica). Este gremio de empresas distribuidoras de energía agrupa las 23 principales empresas del país, que atienden el 98% de los usuarios del país y con presencia en 96% de los municipios de Colombia. De esta manera se logra percibir la siguiente visión para cada uno de ellos, complementando la visión presentada de Colombia en el trabajo presentado en [17]:

3.1 Visión de las Distribuidoras de Energía Eléctrica

Las oportunidades de negocio que perciben los agentes del mercado en el corto, mediano y largo plazo respecto de la distribución de energía en Colombia pueden ser consideradas desde los siguientes enfoques (entrevista a ASOCODIS):

-El Estado desde hace algunos años inició la privatización de compañías en las cuales era accionista mayoritario, existiendo a un algunas de ellas en poder del estado. Como oportunidad de negocio se visualiza el tema de ventas de compañías distribuidoras de energía a inversionistas privados. Esto representa una oportunidad de negocio no solo para inversionistas nacionales sino también para internacionales. La condición para los inversores es que su participación en el mercado no supere el 25% de la demanda nacional para evitar conductas monopólicas.

-La distribución de energía se puede considerar como una actividad monopólica con una regulación y con una rentabilidad establecida. Sus oportunidades de negocio están limitadas a la expansión de sus sistemas eléctricos con el objetivo de atender un mayor crecimiento de la demanda (vertical de los usuarios existentes y horizontalmente de nuevos usuarios) y a eventuales medidas de eficiencia cuando mejoran ciertos indicadores. Adicionalmente, con las nuevas regulaciones implementadas, se habilitó la posibilidad de que empresas distribuidoras puedan desarrollar proyectos del Sistema de Transmisión Regional en mercados de otras distribuidoras del país, lo cual implica una nueva posibilidad de negocio para estas empresas ampliando sus oportunidades.

-En la actualidad surge un gran reto para las Empresas Distribuidoras luego de la entrada en vigencia de la ley 1715 de 2014 (ley que regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional), pues en la medida que se introduzcan masivamente este tipo de nuevos actores a los Sistemas Eléctricos de los Distribuidores, es posible que la demanda atendida disminuya y estas empresas deban reorientar su negocio involucrándose como un actor principal en el ofrecimiento al usuario de nuevas tecnologías de generación para el suministro del servicio compitiendo con otras tecnologías. De esta forma es posible explotar mucho más el beneficio social que ofrecen las mismas.

-Una gran oportunidad de negocio puede surgir para las Operadoras de Red en la medida que se tenga una mayor penetración de vehículos eléctricos o se utilice este energético para el transporte masivo en varias ciudades principales del país.

De este modo, las distribuidoras pueden ayudar a la crisis energética debido al fenómeno del Niño y los

problemas ocasionados por el cargo de confiabilidad. Divulgando a sus usuarios los planes de ahorro en los sistemas energéticos y el uso adecuado y de manera eficiente de la energía, con miras a minimizar las posibilidades de racionamiento por crecimiento de la demanda. Existe en este momento regulación para que los usuarios puedan brindar el servicio de “Respuesta a la Demanda”, la cual no ha entrado en vigencia. Un adecuado otorgamiento de incentivos podría contribuir también a minimizar riesgos de racionamiento.

La problemática evidenciada en los últimos meses de 2015 y comienzo del 2016, sobre el manejo que se le ha dado al por Cargo por Confiabilidad, es un tema sensible para el sector y afecta la formación del precio de generación a los usuarios que atienden las distribuidoras. Las Operadoras de Red han tomado posición frente al tema más como comercializadores de energía que propiamente como distribuidores de energía, pues las condiciones de sobreprecio y cobertura afectan al usuario final, quien permite a través del pago del servicio, que se remuneren todas las actividades de la cadena.

Por otra parte, las distribuidoras piensan que los incentivos que se están otorgando en la Ley 1715 de 2014 pueden ser los adecuados, sin embargo, se requiere un tiempo prudencial para que estén en vigencia y se implementen todas las normativas que deben emitirse de acuerdo a lo contemplado en la ley.

3.2 Visión Estratégica del Estado, Entes Reguladores y de Planeación

El estado consciente de la potencialidad de: la fuentes no convencionales de energía, las redes inteligentes y microrredes para hacer frente a las problemáticas señaladas, ha establecido el plan energético nacional a través de la UPME para los años 2015 a [22], donde se plantean varias estrategias y metas con el fin de utilizar recursos de generación no convencionales, con especial énfasis e interés hacia las comunidades rurales y áreas aisladas del sistema interconectado nacional [21]. Dicho interés incentiva la implementación de microrredes con el fin de satisfacer las necesidades particulares que se tengan en las diferentes ZNI.

Con el fin de garantizar lo estipulado en el plan energético nacional se han creado varias herramientas legales que lo permitan, como lo es la ley 1715 de 2014

de la CREG en la cual se estipulan los siguientes puntos importantes [23]:

- Derecho a reducir anualmente de su renta 50% del valor total de la inversión realizada durante los cinco (5) años siguientes a la realización de dicha inversión.
- Exención del IVA para la importación de recursos y/o equipos destinados a proyectos basados en fuentes de energía no convencionales.
- Exención de aranceles en la importación de materiales e insumos y equipos a utilizar en proyectos con fuentes de energía no convencionales.
- Equipos, maquinaria y obras civiles destinadas a proyectos de generación basados en fuentes de energía no convencionales gozarán de depreciación acelerada.

Los beneficios tributarios y arancelarios expuestos en esta ley son otorgados y respaldados mediante el estatuto tributario, así como también se extienden los beneficios a instituciones de educación superior para investigación y se amplían los beneficios otorgados a proyectos basados en fuentes de energía no convencionales.

El Estado destaca que las leyes relacionadas con energía renovable brindan las bases para los primeros proyectos, y por ende investigaciones en redes inteligentes y microrredes [4,17]. Con los planes que menciona el estado se aspiran a escenarios donde por ejemplo en el 2020 el 8% de la demanda sea cubierta con generación renovable no convencional, y que en el 2030 sea del 15% [17,18].

3.3 Necesidad de Participación Activa de la Demanda

Según el gremio que reúne a los grandes consumidores de energía (Asoenergía), el país necesita incorporar del orden de 2.000 MW de potencia firme en generación de bajo costo. Esta apreciación proviene del aumento de precios que los consumidores sufrieron debido al fenómeno de “El Niño”. Una solución para este déficit de capacidad instalada de bajo costo es la inversión en generación renovable no convencional, microrredes y la demanda puede participar invirtiendo y participando

como autogeneradores. Para incentivar la figura de autogeneradores existen regulaciones en Colombia donde se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración y donde se establecen los límites máximos de potencia de autogeneración a pequeña escala [24].

Por otra parte, en Colombia existen regulaciones que buscan incentivar la respuesta de la demanda fundamentado en un esquema de desconexión voluntaria de demanda. A pesar de que existen estas regulaciones la demanda no las conoce ni utiliza. El uso de esta herramienta conllevaría a que la demanda podría reducir su consumo en respuesta a la señal de precio del mercado mayorista de energía. Los incentivos para la demanda estarán estipulados en contratos bilaterales con los comercializadores, experimentando ahorros en las cuentas de energía eléctrica, principalmente por reducción de consumos en las horas pico.

3.4 Visión de las generadoras

En aras de promover las Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER) en el país, los agentes generadores se encuentran en una posición que favorece el plan energético de expansión para los años 2015 a 2029 realizado por la UPME [25]. El cual estipula estrategias y metas que permiten el aprovechamiento de los recursos no convencionales a lo largo del territorio colombiano, con especial énfasis e interés hacia las comunidades rurales y áreas aisladas del sistema interconectado nacional [21].

Se debe considerar que para que estas fuentes renovables sean parte fundamental de un mercado eléctrico mayorista, los Entes Reguladores y de Planeación deben fortalecer un marco regulatorio que lo permita. Y así, crear condiciones para que las empresas internacionales que quieren ingresar al país para producir energías renovables se decidan a hacerlo [26]. Lo que contribuiría a una mejora en la confiabilidad del servicio de generación teniendo recursos más eficientes como son estas fuentes limpias [21].

4. FUENTES DE FINANCIACIÓN DE LA GENERACIÓN NO CONVENCIONAL DE ENERGÍA RENOVABLE

Como se puede apreciar en las secciones anteriores, la necesidad en Colombia de profundizar en las nuevas fuentes de energía no convencionales (FNCER), es un hecho. La alta dependencia de los recursos hídricos pone en riesgo el sustento eléctrico del país periódicamente; lo cual, es evidente que con el paso del tiempo el impacto de las sequías en el territorio colombiano debido al calentamiento global es cada vez mayor. Adicionalmente el potencial energético es altamente aprovechable siempre y cuando se proporcionen los diferentes instrumentos por parte de los entes gubernamentales, que permitan el desarrollo de las diferentes tecnologías como Eólica, Solar, Geotérmica, Biomasa, entre otras. Un gran paso en este proceso de la inclusión de las FNCER es la ley 1715 de 2014. La cual, define como su objeto [23]: “Promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el Sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético...”. De este objetivo se tienen los instrumentos y elementos para cumplir con este propósito, los cuales han sido clasificados en económicos, normativos y otros [23].

Del mismo modo, el relativo subdesarrollo de las tecnologías no convencionales de energía en el país, radica en los diferentes factores limitantes: políticos, económicos y sociales. Hasta ahora, debido a los costos de inversión asociados, abundancia energética de los recursos convencionales y dificultades socioculturales y políticas, los encargados de tomar las decisiones del sector energético no han logrado trazar una hoja de ruta que fortalezca la inclusión de las FNCER. En la mayoría de los casos, las áreas más viables para el aprovechamiento de las FNCER se encuentran localizadas en sitios alejados de redes eléctricas, comunicaciones y vías de acceso, lo cual dificulta la construcción de estos proyectos [21-22].

Ante estas limitantes, los mecanismos que permiten mitigar las barreras para incursionar las fuentes renovables, son los esquemas de financiamiento a proyectos relacionados con: generación mediante energías limpias, cambio climático y medio ambiente. Estos recursos pueden ser proporcionados por entidades internacionales o locales dependiendo del enfoque que se tenga. A continuación, se describen las principales fuentes de financiamiento:

4.1 Fuentes Internacionales de Financiamiento

Diferentes entidades internacionales de la banca multilateral y del sistema de las Naciones Unidas cuentan con programas para el desarrollo de proyectos de Fuentes de Energía Renovable. Por ejemplo, el banco alemán Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) se caracteriza por el financiamiento de proyectos innovadores en Energías Renovables en Alemania y otros países del mundo. Las dos filiales IPEX (Banco para el Financiamiento Internacional de Proyectos y Exportaciones) y DEG (Corporación Alemana para la Inversión y el Desarrollo), promueven la financiación en Colombia. La primera encaminada al apoyo de compra de productos y tecnologías alemanas en todos los sectores económicos, y la segunda al financiamiento de proyectos de gran envergadura entre 4 y 10 años de duración y créditos hasta 40 millones de Euros. A través del KfW es posible hacer la conexión con otros programas de financiación de bancos como: el Banco Europeo de Inversiones o el Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo. La Sociedad Alemana de Cooperación Internacional, financia hasta el 50 % de proyectos que fortalezcan los temas de Medio Ambiente y Clima en América del Sur. El aporte de esta organización también está enfocado en el acompañamiento de proyectos que se encuentran en desarrollo y desean tener apoyo de personal experto calificado [27].

Por otro lado, el Gobierno Americano por medio de la Agencia de los Estados para el Desarrollo Internacional (USAID), también apoya pequeños proyectos con fuentes renovables en Colombia. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ofrece financiamiento a largo plazo para obras que superan los 10 millones de USD por medio de *Structured and Corporate Finance Department* (SCF). La IIC (Inter-American Investment Corporation /IBD GROUP), de la cual Colombia es miembro, ofrece a las PYMES medios de recibir capital propio y financiamiento de crédito de 1 a 15 millones USD [27]. El Programa

FINPYME Credit, se enfoca en proyectos menores que están entre 100.000 y 600.000 USD [27]. La Fundación Interamericana (IAF) cuenta con recursos donativos por parte del gobierno de los Estados Unidos para promover ideas creativas que ayuden a mejorar la calidad de vida de poblaciones en Zonas No Interconectadas en Latinoamérica y el Caribe.

La Corporación Andina de Fomento (CAF), promueve el desarrollo de sistemas energéticos a través de financiamiento en proyectos dentro de las siguientes líneas estratégicas: energías renovables, electrificación rural e innovación tecnológica [13,28]. Finalizado el año 2013, Colombia solicitó a la CAF 140 millones USD para el desarrollo de generación con energía Solar, Eólica, Hidroeléctrica, Termoeléctrica y en el fortalecimiento de la infraestructura del sistema de Transmisión. En el momento la CAF ofrecen líneas de crédito por hasta 200 millones de dólares y 18 años de plazo. Lo cual es una buena alternativa para seguir promoviendo proyectos con energías renovables en el país.

El FOMIN (Fondo Multilateral de Inversiones del BID) es un fondo para la financiación de propuestas enfocadas en la incorporación de FNCER en áreas rurales de tal manera que se generen esquemas productivos y se ayuden a mitigar el uso de fuentes contaminantes [27]. Este fondo aporta recursos a través de donativos no reembolsables y orientados en su mayoría a la pequeña y mediana empresa [27].

El Banco Mundial por su parte a través del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía (ESMAP) ayuda a diferentes países a estructurar un sistema energético con recursos renovables, desarrollando políticas ambientales y facilitando el apoyo financiero para cumplir el objetivo. BioCarbon Fund que también hace parte del Banco Mundial, financia proyectos que ayuden a conservar el carbono en los sistemas agrícolas y forestales.

EL Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), financia esquemas que fortalezcan y ayuden a preservar el medio ambiente. Estos recursos son gestionados por el Fondo Mundial y está dirigido a todos los grupos organizados de la sociedad civil, comunidades gubernamentales o académicas que tengan proyectos encaminados con este fin.

GEERED (Global Energy Efficiency and Renewable Energy Fund), es una asociación que gestiona fondos del sector público para la inversión de proyectos en energías limpias en países emergentes. La Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), brinda apoyos no reembolsables para el crecimiento social y económico de las regiones en vía de desarrollo. Colombia ha sido favorecida en formación y capacitación principalmente en energías geotérmicas.

El grupo ProCredit financia proyectos amigables con el ambiente (proyectos verdes), con el objetivo de aumentar las inversiones en fuentes renovables, eficiencia energética y gestión sostenible. El financiamiento verde es parte de una estrategia integral que ProCredit está adoptando con el objetivo de mejorar su impacto ambiental a nivel interno y externo. Con lo cual se pretende contribuir a mitigar el cambio climático [29].

4.2 Fuentes Nacionales de Financiamiento

Fondos Estatales

Como parte del propósito para el desarrollo de las Fuentes no Convencionales de Energía Renovable en el país, existen entidades nacionales que tienen esquemas de financiamiento y apoyan los proyectos de energías renovables. Los fondos estatales a los que se pueden tener acceso son: FAZNI (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas), SGR (Sistema General de Regalías), FAER (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas), FECF (Fondo Especial Cuota de Fomento) y FENOGE (Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía) [24].

Los proyectos que deseen tener el apoyo de estos fondos, deben exponer la solución a un problema de servicio energético concertado con la comunidad objetivo y estudios técnicos, ambientales y económicos que muestren la viabilidad del mismo. Se evalúa por las entidades encargadas de los fondos y al ser aprobada la solicitud, se obtiene hasta el 100% de financiamiento del proyecto, el cual pasa a ser no una forma de crédito sino una inversión del Estado.

Los Fondos FANZI y FAER financian programas que desarrollen nueva infraestructura eléctrica de tal manera

que la cobertura del servicio de energía se amplíe y se mejore la demanda en las Zonas no Interconectadas del país y zonas rurales interconectadas. Con el SGR se tienen los siguientes campos: construcción, ampliación, optimización, rehabilitación, montaje, instalación y puesta en servicio de infraestructura en generación eléctrica para las ZNI, generación en el SIN, Alumbrado Público y líneas de transmisión y distribución [27].

FENOGE por su parte fue creado por el artículo 10 de la ley 1715 de 2014 con el fin de promocionar, estimular e incentivar el desarrollo de las actividades de producción y utilización de Fuentes no Convencionales de Energía. Para asegurar la diversificación del abastecimiento energético pleno y oportuno [23,24]. De acuerdo a esto, FENOGE financia recursos a programas que van desde la implementación de autogeneradores en pequeña escala basados en FNCER, hasta proyectos de implementación de nuevas tecnologías de eficiencia energética [27].

Otras Fuentes de Financiación en Colombia

FINDETER (Financiera de Desarrollo Territorial S.A.) es el banco de desarrollo para la infraestructura sostenible del país, el cual presta el servicio de créditos de redescuentos para financiar proyectos de infraestructura pública y privada en Colombia. Recibe ayuda y asistencia de Latin American Investment Facility y de la Unión Europea. Uno de sus objetivos es apoyar la producción, transmisión, transporte, ahorro, distribución y comercialización de energías renovables en el país [24]. Para el año 2015 se contó con una línea específica que financió proyectos de penetración de energías renovables y expansión eficiente de alumbrado público e Iluminación Interior o Exterior [22]. La línea contó con cien mil millones de pesos COP con plazos de hasta 8 años y periodo de gracia a capital hasta 2 años.

Bancoldex-Colciencias es un fondo que apoya la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación de las tecnologías de Fuentes no Convencionales de Energía Renovable en Colombia. El incentivo que se destaca es el prepago de las primeras cuotas de capital correspondientes entre el 25% y 50% del total del crédito para proyectos de innovación. La financiación puede alcanzar el 80% del monto total, de tal manera que la empresa emprendedora contribuya con el 20% restante. Los temas de interés son el diseño, desarrollo de procesos y servicios que fortalezcan la eficiencia energética. Otro tema de interés es la

optimización, simulación y control de procesos. Dentro de los más destacados intereses está el desarrollo de nuevas tecnologías en fuentes no convencionales de energía [30]. Por otro lado, el programa aProgresar de Bancoldex, cuenta con dos líneas de crédito especiales que trabaja bajo el mecanismo de redescuento. El primero es aProgresar-Capitalización que fortalece las MIPYMES de todos los sectores económicos en sus planes de mejoramiento. El cupo para este programa es de aproximadamente 110 mil USD. El Segundo es aProgresar – Modernización, Innovación, el cual cuenta con recursos para proyectos de innovación y desarrollo tecnológico que superan los 330 mil USD [30].

Finalmente, Colciencias cuenta en este momento con convocatorias de proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel). Los cuales están dirigidos a los centros y grupos de investigación que trabajen con el enfoque de las líneas temáticas (Colciencias, 2016). El presupuesto es de \$34 mil millones de pesos para los tres temas centrales: Construcción de Paz, Crecimiento Verde y Recursos renovables y no renovables. Este tercer eje permite el desarrollo de sistemas de generación localizada y distribuida de energía junto con proyectos de aprovechamiento energético de fuentes limpias [31].

CONCLUSIÓN: UNA OPORTUNIDAD DE INVERSIÓN EN FUENTES RENOVABLES

Bajo una perspectiva empresarial o de negocio, la inversión en proyectos de generación de energía a partir de fuentes no convencionales es una buena oportunidad en Colombia. Además de contar con las diferentes fuentes de financiación mencionadas, los incentivos tributarios ofrecidos son bastante favorables para incursionar en un mercado que no está siendo explotado.

Por ejemplo, en la comercialización de energía en áreas rurales o fuera del sistema interconectado, no se presenta actualmente competencia en lo absoluto. La implementación de microrredes resulta una alternativa muy conveniente para poder lidiar con las problemáticas señaladas anteriormente.

Ello se fundamenta en que partiendo de un diseño general se pueden adaptar a las diferentes ZNI, de acuerdo a los recursos energéticos disponibles en cada caso. Es posible proveer de energía eléctrica a dichas comunidades, a partir los mismos recursos renovable que se disponen. Por ejemplo, el potencial energético eólico de Colombia es 29.500 MW, el solar es de 27,7 kWh/m²/día, y el geotérmico 2000 MW. De los cuales, solo se tiene instalado aproximadamente 630 MW.

De acuerdo a lo señalado en esta sección, la conclusión es que los diferentes actores del sector eléctrico colombiano deben preparar planes de inversión donde se contemple alta penetración de generación distribuida, redes inteligentes, microrredes y parques de generación renovable no convencionales (Figura 5). De esta forma se puede lograr un sistema más robusto ante las problemáticas descritas en la segunda sección: combinación de generación, poca presencia de fuentes alterativas de generación renovable, vulnerabilidad de los grandes consumidores a las fluctuaciones de los precios y confiabilidad en el suministro a las ZNI.

Todo esto muestra el buen panorama que se tiene para la inversión de Fuentes no Convencionales de Energía Renovable en Colombia. La motivación es amplia por parte de las diferentes organizaciones que buscan el crecimiento energético limpio en nuestro país en un corto mediano y largo plazo. Con esto, se invita a hacer parte de este desarrollo nacional.

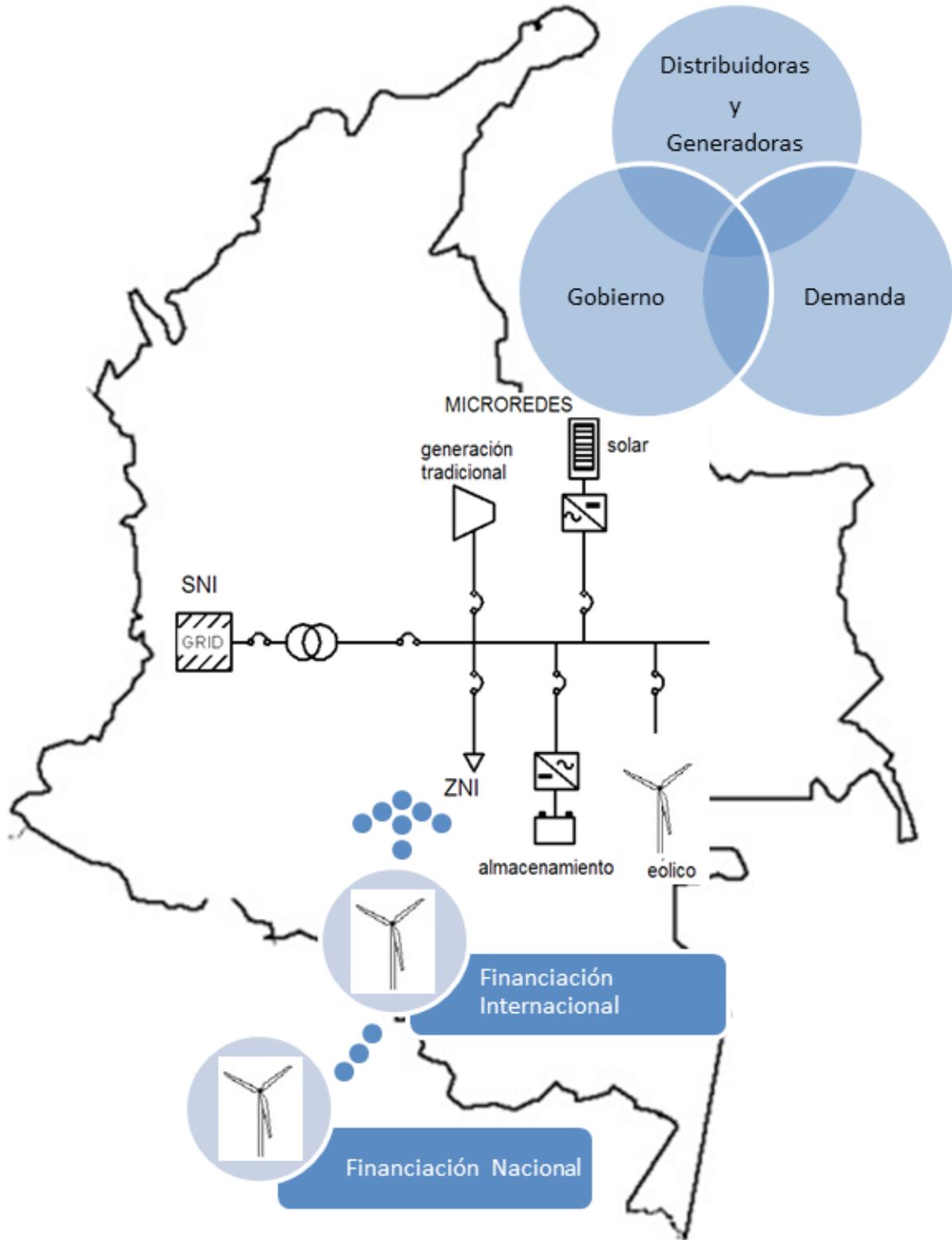


Figura 5. Oportunidad de Inversión en Fuentes Renovables en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] S. Bello, & R. Beltran, "Caracterización y pronóstico del precio spot de la energía eléctrica en Colombia," *Rev. maestr. derecho econ.* vol. 6, pp. 293-316, 2010.
- [2] R.D. Cruz, H. Torres, M.M. Montoya, J. Barrientos, L.M. Pineda, L.M. Niebles, et al., "Caracterización del sector eléctrico colombiano," Servicio Nacional de Aprendizaje, Medellín: SENA, jun. 2013. Disponible en: <file:///C:/Users/UPTC/Downloads/3058.pdf>
- [3] S. Carvajal & D. Marín, "Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico," *Tecnura*, vol. 17, n° 35, pp. 77-89, 2013. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.1.a07>.
- [4] E.E. Gaona, C.L. Trujillo, & J. A. Guacaneme, "Rural microgrids and its potential application in Colombia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 125-137, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.176>.
- [5] S. Ortiz, "Generación Eléctrica," *Mundo Eléctrico*, vol. 99, pp. 1-98, 2015.
- [6] J. Pinto Nolla, "Mejora de Acceso a Mercados Energéticos Fase I – Colombia, Estudio Integral de la Situación Actual y Perspectivas del Mercado Energético de Colombia," Organización Latinoamericana de Energía, Quito: OLADE, Oct. 2013. Disponible en: <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Colombia%20Informe%20Final%20Octubre%20V3.pdf>
- [7] UPME, *Boletín Estadístico de Minas y Energía 1990 – 2010*, Bogotá: UPME, 2010.
- [8] UPME, *Boletín Estadístico de Minas y Energía 2010 – 2015*, Bogotá: UPME, 2015
- [9] O. Agudelo, & L. Arango, "Evolución de la confiabilidad y la eficiencia en el sector eléctrico Colombiano." *Ventana Informática*, vol. 24, pp. 115-133, 2011.
- [10] A. Rueda, I. Bonilla, & Y. Garzón, "Modelo de confiabilidad basado en la norma de gestión de riesgos iso 31000 para empresas de distribución de energía eléctrica en circuitos radiales," *Tecnura*, vol. 19, pp. 41-50, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a04>
- [11] I. Durán, L. Rosero, A. Pavas, & O. Duarte, "Comparación of maintenance scheme effects on power transformer reliability performance," *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, pp. 73-81, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1Su.p.53435>
- [12] UPME, "Informe sectorial sobre la evolución de la distribución y comercialización de energía eléctrica en Colombia: balance de sucesos y estadísticas 1998-2010," Medellín: UPME, 2011
- [13] A. Briceño, "Colombia: análisis del sector eléctrico," Caracas: Corporación Andina de Fomento – CAF, 2006.
- [14] L. Vélez, *El sector eléctrico colombiano: descripción, situación actual, retos y perspectivas*, Agosto, 2015 Retrieved Julio 4, 2016, from: <http://luisguillermovelezalvarez.blogspot.com.co/2015/08/el-sector-electrico-colombiano.html>
- [15] *Régimen Básico, Ley 142 de 1994, Ley 143 de 1994, Ley 689 de 2001, Ley 632 de 2000, Decreto 990 de 2002*, Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2014.
- [16] Interconexión Eléctrica S.A, "El sector Eléctrico Colombiano Orígenes, Evolución y Retos. Un siglo de desarrollo 1882-1999", Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A., 2012.
- [17] A. Vargas, O. Saavedra, M. Samper, S. Rivera, S., & R. Rodríguez, "Latin American Energy Markets: Investment Opportunities in Nonconventional Renewables," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, pp. 38-47, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2573862>.
- [18] H. García, A. Corredor, L. Calderón, & M. Gómez, "Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia", FEDESARROLLO, Centro de Investigación Económica y Social, Bogotá, 2013.
- [19] ACOLGEN. *Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica* [Online]. Colombia: Bogotá, Jul. 2016 Disponible en: <http://www.acolgen.org.co/>
- [20] J. Moreno, C. Rodríguez, & R. Suesca, "Generación híbrida de energía eléctrica como alternativa para zonas no interconectadas," *Ingeniería*, vol. 12, pp. 57-63, 2006.
- [21] UPME, *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*, Medellín: UPME, 2015.
- [22] UPME, *Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2015 – 2029*, Marzo, 2016, Retrieved Julio 5, 2016, from: <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/fotonoticias/plan-de-expansion-2015-2029>

- [23] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1715 de 2014*, Junio, 2016. Retrieved Julio 5, 2016, from: <http://www.secretariassenado.gov.co/senado/>
- [24] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 40393 de 2015_Diario oficial N° 49.469 de 30 de marzo de 2015” Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, D.C., Marzo, 2015. Retrieved Julio 5, 2016, from: http://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minminas_40393_2015.htm
- [25] UPME, *Sistema de Gestión de Información y Conocimiento en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (SGIC - FNCER)*, (UPME), 2016. Retrieved Julio 5, 2016, from: <http://www1.upme.gov.co/sgic/>
- [26] Centrales Electricas de Nariño S.A. E.S.P. CEDENAR, *Sector eléctrico, de acuerdo con nuevo plan de expansión* [Online], CEDENAR, Feb. 2016. Retrieved from: <http://www.cedenar.com.co/index.php/productos-servicios/noticias/147-sector-electrico-de-acuerdo-con-nuevo-plan-de-expansion>
- [27] H. Calderón, “Financiación de Proyectos en el sector de energías renovables en Colombia”, Foro de Energías Renovables para zonas no interconectadas, Bogotá, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.1.a07>
- [28] CAF - Banco de desarrollo de América Latina, *Sistemas energéticos sostenibles* [online]. Caracas, 2013 Disponible en: <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/477/Energia%202015.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [29] Internationale Projekt Consult – IPC GmbH, Un enfoque metodológico destinado a recopilar una lista de medidas estándar de inversión en eficiencia energética que reúnan los requisitos necesarios, Bogotá: ProCredit, 2013.
- [30] Bancoldex. *A Progresar* [Online], julio, 2016. Retrieved Junio 30 de 2016, from: https://www.bancoldex.com/Memorias/Memorias_aProgresar_Financiero.aspx
- [31] Colciencias, *Convocatoria para proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación y su contribución a los retos de país -2016* [Online], Bogota: Colciencias, 2016.
- [32] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución No 097 de 2008*, 2008.
- [33] Ministerio de Minas y Energía, Proyecto de Decreto “Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías Renovables y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE”, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2005.

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN OPERANDO BAJO CICLO COMBINADO

Exergy analysis of cogeneration plant operating under combined cycle

Hernán Darío Patiño Duque¹, Brayan Darío Rosero Coral¹

¹Universidad Tecnológica de Pereira -UTP, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo inv. Genenergética, Colombia. E-mail: hedapatino@utp.edu.co, bdrosero@utp.edu.co

(Recibido Julio 27 de 2016 y aceptado Octubre 21 de 2016)

Resumen

En la actualidad, hay diversas formas para generar energía eléctrica; una de ellas consiste en aprovechar la cantidad de energía liberada al quemar un combustible y efectuar una serie de procesos de conversión de energía mediante un ciclo termodinámico. Para hacer estos procesos más eficientes, existen técnicas que permiten analizar en qué equipos de la planta se está desaprovechando energía; una de estas técnicas es el análisis exergético, que consiste en la aplicación simultánea de la primera y segunda ley de la termodinámica. En el presente trabajo se realiza el análisis exergético a una planta de generación de electricidad y calor a partir de la producción de vapor operando bajo un ciclo combinado. Inicialmente se definen conceptos importantes para realizar el análisis. Después de aplicar la primera y segunda ley de la termodinámica los resultados indican que la eficiencia exergética de la planta de ciclo combinado es 53% y se encuentra que la cámara de combustión es el componente del sistema que más exergía destruye y que las bombas son los dispositivos donde hay menor pérdida de energía útil.

Palabras clave: Balance exergético, ciclo combinado, cogeneración, energía, irreversibilidad.

Abstract

Nowadays, there are several ways to generate electricity; one of them is to harness the amount of energy released after burning a fuel and carrying out a series of processes to convert energy through a thermodynamic cycle. To make these processes more efficient, there are techniques that allows to analyze which plant devices are wasting energy; one of these techniques is exergy analysis which consists on a simultaneous application of the first and second law of thermodynamics. This paper shows the exergy analysis in a plant of electricity and heat generation from the steam production operating under a combined cycle. Initially, important concepts are defined to perform exergy analysis. After applying the first and second law of thermodynamics, the results indicate that the exergy efficiency of the plant of combined cycle is 53% and the combustion chamber is the device that destroyed more exergy in the system and the pumps are devices where occur less destruction of exergy.

Key words: Exergy balance, combined cycle, cogeneration, energy, irreversibility.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica tiene un papel clave en el desarrollo económico y social de un país, esto ha hecho que compañías empiecen a generar electricidad por medio de centrales termoeléctricas de ciclo combinado [1]. Las plantas de ciclo combinado acoplan el ciclo Brayton con el ciclo Rankine [2]. La idea básica consiste en utilizar la energía contenida en los gases de escape de la cámara

de combustión, en un proceso de vapor conectado por medio de una caldera de recuperación aguas abajo de la turbina de gas [3]. En una central de ciclo combinado la caldera de recuperación HRSG (heat recovery steam generator) representa el elemento de la interfaz entre la turbina de gas y el ciclo de vapor. Aquí, los gases de escape de la turbina de gas se enfrían y el calor recuperado

Cómo citar este artículo:

H.D. Patiño-Duque, & Brayan Dario Rosero Coral, "Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo Combinado," *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 49-58, Enero, 2017.

| Nomenclatura | | Subíndices | |
|---------------------|--|------------|----------------------------------|
| b | exergía específica [kJ/kg] | a | aire |
| \dot{B} | Flujo de exergía [kW] | e | entrada |
| \dot{B}_D | flujo de exergía destruida [kW] | f | combustible |
| C_p | calor específico a presión constante [kJ/kg K] | o | estado muerto |
| h | entalpía específica [KJ/kg] | v | vapor |
| k | constante adiabática [-] | s | salida |
| \dot{m} | flujo másico [kg/s] | | |
| PCI | poder calorífico inferior [KJ/kg] | | <i>Abreviaciones</i> |
| \dot{Q} | flujo de calor [KW] | C | compresor |
| γ_p | relación de compresión [-] | CC | cámara de combustión |
| s | entropía específica [KJ/kg K] | Cond | condensador |
| T | temperatura [°C] | HRSG | caldera de recuperación |
| W | Potencia | IA | intercambiador abierto |
| <i>Letra griega</i> | | IC | intercambiador cerrado |
| η | eficiencia energética | TG | turbina de gas |
| ε | eficiencia exergética | P | Proceso industrial |
| | | TVAP | turbina de vapor de alta presión |
| | | TVBP | turbina de vapor de baja presión |

Se utiliza para generar vapor. Con el fin de proporcionar una mejor recuperación de calor en la HRSG, se suele utilizar más de un nivel de presión [4]. Las plantas que operan bajo ciclo combinado presentan ventajas respecto a las de ciclo Rankine y Brayton independientes; algunas de estas ventajas son la relación costos beneficios y el bajo impacto ambiental; según [5] una central de ciclo combinado con gas natural requiere una inversión de unos 500 €/kW, y alcanza un rendimiento bruto cercano al 59% a plena carga, una central térmica de carbón, incluso las dotadas con calderas supercríticas de última generación y sistemas de depuración de gases de combustión, tienen un rendimiento del orden del

45% con costos de inversión en el entorno de los 1000 €/kW.

Las configuraciones de las plantas de ciclo combinado han venido cambiando, debido a las necesidades de las industrias, es aquí donde sale el término cogeneración [6]. La cogeneración es la producción simultánea de energía eléctrica o mecánica y energía térmica útil a partir de un único flujo de energía (combustible) como el petróleo, carbón, gas natural o licuado, biomasa [7]. Resulta favorable hablar de cogeneración donde hay demanda de energía térmica, como el caso de los procesos industriales.

Con el fin de mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio de energía en una planta, se han planteado diferentes metodologías de análisis, una de éstas es el análisis exergético [8]. Ésta técnica se plantea con base a la segunda ley de la termodinámica y es considerada como una herramienta poderosa en el análisis de sistemas térmicos, para identificar los lugares y las magnitudes de las irreversibilidades; cabe resaltar que algunas de las irreversibilidades que se encuentran después de hacer un análisis exergético no pueden ser eliminadas, pero si se pueden mejorar, ya sea rediseñando el equipo o el proceso donde se presenten [9, 17].

Para la evaluación del desempeño termodinámico de plantas de ciclo combinado, muchos investigadores han realizado diferentes métodos de análisis. Además del análisis de primera ley de la termodinámica, aplicaron la segunda ley para calcular el flujo de exergía destruida y la eficiencia exergética de cada componente de la planta.

“Según [10]”, se realizó el análisis exergético a la planta de ciclo combinado ATAER, localizada en la zona industrial Izmir Atatürk-Turquia; esta planta entró en funcionamiento en Octubre de 1998 con una sola turbina de gas, en el 2001 se le adicionó una turbina de vapor y empezó a operar como ciclo combinado. En el año 2009 se le instaló una caldera de recuperación y otra turbina de gas. Ersayin obtuvo como resultados: eficiencia energética del 56% y rendimiento exergético del 50.04%. En la referencia [11], aplicó un análisis exergético convencional y avanzado a una planta de ciclo combinado con recalentamiento. Con el análisis convencional identificó las irreversibilidades en el sistema y con el análisis avanzado encontró las exergías endógenas y exógenas destruidas en cada componente de la planta. [1] propuso la evaluación energética y exergética de una planta de cogeneración híbrida con ciclo Rankine regenerativo. [12] investigó las técnicas para reducir las irreversibilidades de las calderas de recuperación (HRSG) de los ciclos combinados, también modeló y analizó métodos modernos de enfriamiento para ciclos combinados comerciales. De acuerdo al estudio, al reducir las diferencias de temperaturas del pinch point y reducir las tasas de flujo de masa de vapor se reducen las irreversibilidades. En la referencia [13], muestra los resultados de un análisis exergoeconómico a un sistema de cogeneración con turbina de gas y describe la viabilidad de cogeneración en plantas de ciclo combinado. [14] expone el análisis exergético de

una central de ciclo combinado con interenfriamiento en la combustión de la turbina; el análisis muestra que la eficiencia en el ciclo con interenfriamiento aumenta en un 3.13%, además la exergía destruida en todos los componentes, baja 2%.

Los estudios en [15], muestra la evaluación del rendimiento de una instalación de generación de electricidad situada en Turquía con un análisis exergético avanzado; esta planta opera bajo ciclo combinado, usa como combustible gas natural y el sistema de conversión de energía consiste de un compresor, una cámara de combustión, una turbina de gas, la caldera de recuperación, turbinas de vapor de alta, baja presión y un condensador.

A diferencia de la literatura donde no se tiene en forma simultánea recalentamiento, cogeneración y envío del agua de alimentación hacia un intercambiador de calor tipo abierto, el presente trabajo pretende evaluar las condiciones de operación asumidas y la configuración de los elementos en la planta de ciclo combinado propuesta en la Figura 1 por medio de un análisis exergético convencional, donde se utiliza esta metodología para identificar los lugares donde se presentan las mayores pérdidas de exergía e ineficiencias, esto con el cálculo del valor de la eficiencia exergética de la planta y la exergía destruida de cada componente.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Tal como se muestra en la Figura 1, la planta de cogeneración está conformada principalmente por una planta de turbina de gas, donde el combustible utilizado es gas natural, una caldera de recuperación HRSG, una turbina de vapor de alta y una de baja presión, un intercambiador de calor tipo cerrado y uno tipo abierto, a ésta se le puede denominar como planta de cogeneración debido a que produce y suministra energía eléctrica y vapor para un proceso industrial.

2.1 Supuestos

* La configuración de éste sistema produce 300 kg/s de aire y 31,58 kg/s de vapor. La temperatura máxima del ciclo de gas es de 1247 °C.

* En una planta térmica las condiciones ambientales dependen de la ubicación geográfica. Las condiciones

de referencia ambientales consideradas en este trabajo son 25°C y 101,325 kPa, las cuales son acordes a las condiciones de Colombia.

* La temperatura del vapor sobrecalentado en la salida de la caldera de recuperación es de 591,9 °C con una presión de 6 MPa.

*La planta cuenta con un recalentamiento y posteriormente el vapor se expande en una turbina de vapor hasta la presión del proceso industrial que es de 520 kPa. La presión de condensación es de 10 kPa. Los valores nominales de operación (Presión, temperatura,

eficiencias isentrópica de turbinas y bombas, etc...) se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Eficiencia isentrópica de los componentes

| Componente | Eficiencia isentrópica |
|------------|------------------------|
| C | 84% |
| CC | 85% |
| Bombas | 70% |
| TG | 86% |
| TVAP, TVBP | 86% |

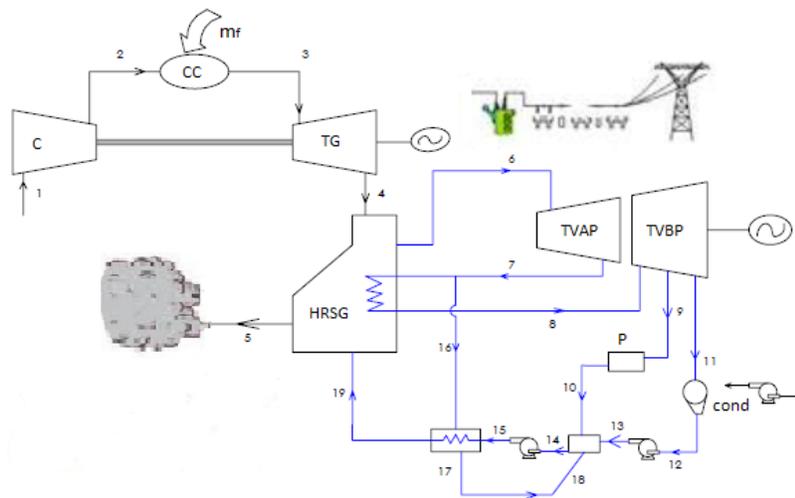


Figura 1. Diagrama de flujo, planta de ciclo combinado.

Tabla 2. Condiciones de operación de la planta propuesta

| Condiciones de operación | Valor |
|---|--------------|
| Flujo másico de aire | 300 (kg/s) |
| Flujo másico de vapor, entrada TV de alta presión | 31,58 (kg/s) |
| Temp máxima del ciclo de gas | 1247 (°C) |
| Presión del vapor en la caldera de recuperación | 6000 (kPa) |
| Temp del vapor en la caldera de recuperación | 591,9 (°C) |
| Presión de recalentamiento | 2000 (kPa) |
| Temperatura de recalentamiento | 591,9(°C) |
| Presión de proceso industrial | 520 (kPa) |
| Temp salida proceso industrial | 153(°C) |
| Presión de condensador | 10 (kPa) |
| Poder calorífico inferior del combustible | 45000 |
| Relación de compresión | 10 |
| DTF | 10 |

3. METODOLOGÍA Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Exergía es la máxima cantidad de trabajo útil que un sistema puede realizar cuando es llevado desde un estado cualquiera hasta las condiciones de referencia ambientales, mediante procesos reversibles [16]. Generalmente la exergía no se conserva, ésta se destruye en el sistema y la destrucción de la exergía es la medida de la irreversibilidad, que es la fuente de pérdida de rendimiento en los sistemas térmicos [9]. El desempeño de los sistemas térmicos usualmente es evaluado por la aplicación de la primera ley de la termodinámica, la cual se basa en el balance de energía. Sin embargo, la primera ley no brinda la información suficiente acerca de la cantidad y el lugar de las irreversibilidades, por lo tanto se debe hacer un estudio en base a la segunda ley para tener en cuenta la calidad de la energía [17].

Para sistemas que operan en régimen permanente como las centrales eléctricas, el balance de masa y análisis de primera ley con cambios de energía cinética y potencial despreciables, se pueden expresar respectivamente como las ecuaciones 1 y 2, en la ecuación [18].

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e = \sum_{\text{salida}} \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e h_e = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum_{\text{salida}} \dot{m}_s h_s \quad (2)$$

La segunda ley de la termodinámica se puede expresar como la ecuación 3:

$$\sum_{\text{salida}} \dot{m}_s s_s - \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e s_e \geq \int \frac{\delta \dot{Q}}{T} \quad (3)$$

Según [19], el flujo de exergía \dot{B} se puede dividir en distintos componentes: exergía cinética, exergía potencial, exergía física y exergía química, acorde a la ecuación 4:

$$\dot{B} = \dot{B}_{\text{cinética}} + \dot{B}_{\text{potencial}} + \dot{B}_{\text{física}} + \dot{B}_{\text{química}} \quad (4)$$

Los componentes: exergía cinética, exergía potencial y la exergía química no son considerados en este estudio. La ecuación 5 presenta la exergía física específica:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

Donde h es la entalpía específica, s es la entropía específica y el subíndice 0 indica el estado muerto restringido (Carranza Sánchez & de Oliveira, 2015).

El flujo total de exergía física asociado con una corriente de fluido es:

$$\dot{B} = \dot{m} b = \dot{m}(h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

Si se hace un balance de exergía (combinación de la primera y segunda ley de la termodinámica) para un volumen de control, con varias entradas y salidas de flujo, que además genera potencia y recibe de sus alrededores flujo de calor, se tiene la siguiente ecuación (7) (Sanz, 2014).

$$\dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{W}_e + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e b_e = \dot{W}_s + \sum_{\text{salida}} \dot{m}_s b_s + \dot{B}_D \quad (7)$$

La variable \dot{B} , es el flujo de exergía en kW, además esta ecuación tiene como objetivo encontrar las pérdidas de energía en los procesos (a esta energía también se le conoce como exergía destruida \dot{B}_D).

La eficiencia de segunda ley o también llamada eficiencia exergética se puede expresar como la relación entre las salidas de exergía útil producida y la consumida, ecuación 8; debido a ésta definición la eficiencia de segunda ley no puede exceder el 100 por ciento.

$$\varepsilon = \frac{\text{Exergía} \cdot \text{útil} \cdot \text{producida}}{\text{Exergía} \cdot \text{consumida}} \quad (8)$$

Otro concepto importante al momento de realizar un análisis exergético es la exergía específica del combustible; según [20] las exergías estándar de la mayoría de los combustibles son similares a sus valores del poder calorífico inferior (PCI) y se pueden calcular con la ecuación 9, expresión utilizada para determinar la eficiencia exergética de la cámara de combustión.

$$b_f = 1.06 \times PCI \quad (9)$$

Donde el PCI es igual al calor liberado por la combustión completa de todos los componentes del combustible y cuando el H₂O en los productos está en forma de vapor.

Existen herramientas computacionales que permiten dar solución a problemas de ingeniería, una de éstas es el programa EES (Engineering Equation Solver), la función básica de este software es la resolución numérica de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales. Además, el EES suministra funciones integradas propias y termodinámicas para muchos fluidos [21].

En este trabajo las propiedades termodinámicas de los fluidos, se obtuvieron usando EES. Por medio de las ecuaciones 1 y 2, se obtienen los flujos de masa para cada una de las extracciones de las turbinas tanto la de baja, como la de alta presión; posteriormente con la ecuación 5 se determina la exergía específica en cada uno de los puntos de la planta térmica, para así proceder

a realizar los balances de exergía en los dispositivos encargados del proceso de conversión de energía con la ecuación 7.

Las eficiencias de segunda ley para cada uno de los dispositivos se obtuvieron con la ecuación 8, teniendo en cuenta que la exergía en la cámara de combustión asociada al combustible se calculó con la ecuación 9.

Los balances exeréticos y las eficiencias de segunda ley para los diferentes componentes, se encuentran en la Tabla 3, donde al ingresar éstas ecuaciones al software EES, éste soluciona las incógnitas y pueden ser presentadas en forma de tablas.

Tabla 3. Balance de exergía y Eficiencia exerética de los componentes

| Componente | Balance de Exergía | Eficiencia Exerética |
|------------|--|--|
| C | $\dot{B}_1 + W = \dot{B}_2 + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_2 - \dot{B}_1}{W}$ |
| CC | $\dot{B}_2 + \dot{m}_f * b_f = \dot{B}_3 + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_3 - \dot{B}_2}{\dot{m}_f * b_f}$ |
| Cond | $\dot{B}_{11} = \dot{B}_{12} + \dot{B}_D$ | ----- |
| HRSG | $\dot{B}_4 + \dot{B}_7 + \dot{B}_{19} = \dot{B}_5 + \dot{B}_6 + \dot{B}_8 + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_6 + \dot{B}_8 - \dot{B}_7 - \dot{B}_{19}}{\dot{B}_4 - \dot{B}_5}$ |
| IA | $\dot{B}_{10} + \dot{B}_{13} + \dot{B}_{18} = \dot{B}_{14} + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_{14}}{\dot{B}_{10} + \dot{B}_{13} + \dot{B}_{18}}$ |
| IC | $\dot{B}_{15} + \dot{B}_{16} = \dot{B}_{17} + \dot{B}_{19} + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_{19} - \dot{B}_{15}}{\dot{B}_{16} - \dot{B}_{17}}$ |
| TG | $\dot{B}_3 = \dot{B}_4 + W + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{W}{\dot{B}_3 - \dot{B}_4}$ |
| TV | $\dot{B}_6 + \dot{B}_8 = \dot{B}_7 + \dot{B}_9 + \dot{B}_{11} + W + \dot{B}_D$ $\dot{B}_6 + \dot{B}_8 = \dot{B}_7 + \dot{B}_9 + \dot{B}_{11} + W + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{W}{\dot{B}_6 + \dot{B}_8 - \dot{B}_7 - \dot{B}_9 - \dot{B}_{11}}$ |
| Bomba 1 | $\dot{B}_{12} + W = \dot{B}_{13} + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_{13} - \dot{B}_{12}}{W}$ |
| Bomba 2 | $\dot{B}_{14} + W = \dot{B}_{15} + \dot{B}_D$ | $\varepsilon = \frac{\dot{B}_{15} - \dot{B}_{14}}{W}$ |

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El modelo termodinámico del ciclo combinado y la solución de las ecuaciones de balance de masa, energía

se realizaron usando EES [22]. La Tabla 4 muestra datos de temperatura, presión, flujo de exergía, flujos másicos para cada estado de la planta.

Tabla 4. Propiedades de los estados en los diferentes puntos correspondientes a la Figura 1

| Punto | m [kg/s] | T [°C] | P [kPa] | h [kJ/kg] | s [kJ/kW K] | \dot{B} [kW] |
|-------|----------|--------|---------|-----------|-------------|----------------|
| 0 | --- | 25 | 101,3 | 298,6 | 5,695 | --- |
| 1 | 300 | 25 | 101,3 | 298,6 | 5,695 | 0 |
| 2 | 300 | 355,2 | 1013 | 637,2 | 5,796 | 92583 |
| 3 | 300 | 1247 | 1013 | 1661 | 6,799 | 309904 |
| 4 | 300 | 616,9 | 101,3 | 922 | 6,835 | 85120 |
| 5 | 300 | 148,2 | 101,3 | 422,9 | 6,044 | 6115 |
| 6 | 31,58 | 591,9 | 6000 | 3639 | 7,145 | 91846 |
| 7 | 31,58 | 429,8 | 2000 | 3313 | 7,222 | 80830 |
| 8 | 27,64 | 591,9 | 2000 | 3672 | 7,682 | 76874 |
| 9 | 25,45 | 401,5 | 520 | 3275 | 7,78 | 59925 |
| 10 | 25,45 | 153 | 520 | 645,3 | 1,873 | 37813 |
| 11 | 2,189 | 58,56 | 10 | 2608 | 8,223 | 3407 |
| 12 | 2,189 | 45,82 | 10 | 191,8 | 0,6493 | 6173 |
| 13 | 2,189 | 45,89 | 520 | 192,6 | 0,6499 | 3059 |
| 14 | 31,58 | 153,3 | 520 | 646,8 | 1,876 | 46940 |
| 15 | 31,58 | 154,6 | 6000 | 655,4 | 1,882 | 47154 |
| 16 | 3,944 | 429,8 | 2000 | 3313 | 7,222 | 10094 |
| 17 | 3,944 | 212,4 | 2000 | 908,7 | 2,447 | 6223 |
| 18 | 3,944 | 153,3 | 520 | 908,7 | 2,49 | 6173 |
| 19 | 31,58 | 222,4 | 6000 | 955,6 | 2,533 | 50509 |

La Tabla 5 describe las eficiencias exergéticas de los componentes y la eficiencia exergética de la planta; éstas se muestran gráficamente en la Figura 3.

La Figura 4 enseña la distribución de porcentaje del flujo de exergía destruida en cada equipo del sistema. Se encuentra que la cámara de combustión es el equipo que mayor exergía destruye con un 76%, seguido por la caldera de recuperación con un 18 %, después le sigue el compresor con un 4% y por ultimo las turbinas de gas y vapor con un 1%; estos valores guardan la secuencia descrita por [1].

Tabla 5. Eficiencia exergética, flujos de exergía entrada y salida, exergía destruida

| Componente | ε (%) | \dot{B}_e [kW] | \dot{B}_s [kW] | \dot{B}_D [kW] |
|------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| C | 91,14 | 101579 | 92583 | 8996 |
| CC | 54,7 | 489870 | 309904 | 179981 |
| Cond | 100 | 3407 | 3058 | 348,6 |
| HRSG | 47,31 | 216459 | 174835 | 41624 |
| IA | 99,78 | 47045 | 46940 | 105 |
| IC | 86,68 | 57248 | 56732 | 516 |
| TG | 98,56 | 309904 | 306668 | 3236 |
| TV | 92,59 | 168720 | 166899 | 1821 |
| Bomba 1 | 100 | 3059,611 | 3059 | 0,611 |
| Bomba 2 | 100 | 47210 | 47154 | 56 |
| Planta | 53 | --- | --- | --- |

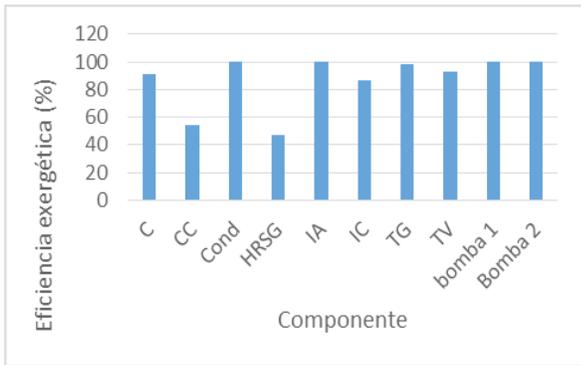


Figura 3. Eficiencia exerética de los componentes de la planta

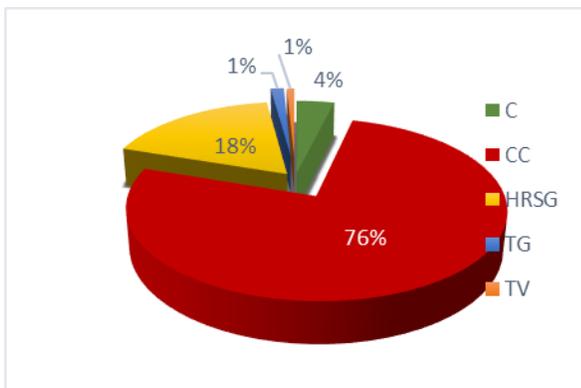


Figura 4. Distribución de porcentajes de la exergía destruida

Con los resultados se verifica que el lugar donde hay mayores pérdidas de exergía es donde se efectúa el proceso de combustión. Según [15], la destrucción de exergía es más alta en la cámara de combustión debido a que las reacciones químicas causan altas irreversibilidades y por la transferencia de calor a través de las grandes diferencias de temperatura entre los gases del quemador y el fluido de trabajo, por lo tanto, uno debería centrarse en la mejora de este dispositivo. El aumento de la proporción de la masa aire-combustible puede causar la disminución de las tasas de destrucción de exergía [15]. Los dispositivos que presentaron la menor pérdida de exergía fueron las bombas y los intercambiadores de calor, estos valores tan bajos se deben principalmente a la baja diferencia de temperaturas entre sus corrientes.

Como se mencionó anteriormente el objetivo de este trabajo es evaluar la disposición de los elementos de la planta propuesta, se tiene que, con las condiciones de operación, la planta presenta una eficiencia exerética del 53%, se puede afirmar que este valor corresponde

a un sistema de elevado rendimiento en conversión de energía y por lo tanto que hay una buena distribución de los equipos que conforman la planta y los parámetros de operación de la planta que fueron asumidos hacen que dicha configuración sea altamente eficiente. Si se realiza el cálculo de la eficiencia de primera ley, ésta sería un valor superior a la eficiencia de segunda ley, un rendimiento bruto cercano a las dichas por [5].

CONCLUSIONES

En este artículo se realizó el análisis exerético de una planta con una distribución particular de sus componentes. Se expusieron de forma concisa los balances de exergía y eficiencia exerética de los dispositivos para conocer los lugares donde se presentan las mayores irreversibilidades. Según el análisis realizado, éste muestra que la disposición de los elementos de la planta es adecuada, debido a que la eficiencia exerética es del 53% valor que supera incluso a estudios realizado por investigadores como [10].

El análisis exerético revela los componentes que tienen las más altas ineficiencias termodinámicas (destrucción de exergía). La cámara de combustión es el componente principal que contribuye más a la ineficiencia general de la planta. (Aproximadamente el 76% de la destrucción total de exergía es causada por la CC). Después de la cámara de combustión, el elemento que presenta mayor destrucción de exergía es la HRSG, donde se destruyen 41.6 MW que representan un 18% de la exergía total que entra al ciclo. El porcentaje de destrucción de exergía en el compresor fue del 4% mientras que en los demás elementos que conforman la planta fue menos del 2%. Según los resultados mostrados en la Tabla 4, como recomendación la temperatura de los gases que se emiten al ambiente después del paso por la HRSG aún tienen una temperatura elevada que podría ser aprovechada para realizar un posible proceso de calentamiento, logrando con esto un nuevo calor en el ciclo, lo cual aumentaría la eficiencia exerética de la planta.

Es recomendable realizar estudios de viabilidad de la cogeneración y realizar un análisis exergoeconómico de la planta propuesta para determinar el costo de generación de potencia y el costo del vapor de proceso.

REFERENCIAS

- [1] S. Anvari, S. Jafarmadar, & S. Khalilarya, "Proposal of a combined heat and power plant hybridized with regeneration organic Rankine cycle: Energy-Exergy evaluation," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 357–365, August, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.002>.
- [2] Xiang, W., & Chen, Y. "Performance improvement of combined cycle power plant based on the optimization of the bottom cycle and heat recuperation," *Journal of Thermal Science*, vol. 16, n° 1, pp. 84–89, 2007. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1007/s11630-007-0084-4>.
- [3] J.H. Horlock, "Combined power plants - past, present, and future," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 117, n°4, pp. 608–616, October, 1995. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2815448>.
- [4] C. Casarosa, F. Donatini, & A. Franco, Thermo-economic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants. *Energy*, 29(3), 389–414, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00078-6).
- [5] S. Sabugal García & F. Gómez Moñux, "Centrales Termicas De Ciclo Combinado: Teoría Y Proyecto," Endesa, Ed. Madrid: España, 2006.
- [6] I. Prieto Fernández, Ciclos combinados [online]. Gijón: E.P.S. de Ingeniería, Julio, 2006. Retrieved from: http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1012/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT14_Centrales_termicas_de_ciclo_combinado.pdf
- [7] H.I. Onovwiona, & V.I. Ugursal, "Residential cogeneration systems: review of the current technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, n° 5, pp. 389-431, 2006. Retrieved from: Doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2004.07.005>
- [8] Y.M. El-Sayed, & R.A. Gaggioli, "A Critical Review of Second Law Costing Methods—I: Background and Algebraic Procedures," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 111, n° 1, pp. 1–7, Mar. 1989. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3231396>.
- [9] I.H. Aljundi, "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan". *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, n° 2-3, pp. 324-328, February 2009. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029>.
- [10] E. Ersayin, & L. Ozgener, "Performance analysis of combined cycle power plants: A case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 832–842, 2015. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.082>.
- [11] F. Petrakopoulou, G. Tsatsaronis, T. Morosuk, & A. Carassai, "Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant," *Energy*, vol. 41, n° 1, pp. 146-152, 2012. Retrieved from: Doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.028>
- [12] A.M. Bassily, "Modeling, analysis, and modifications of different GT cooling techniques for modern commercial combined cycle power plants with reducing the irreversibility of the HRSG," *Applied Thermal Engineering*, vol 53 n°1, pp. 131–146, April, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.002>.
- [13] E.V. Torres Gonzáles, M. Salazar Peryra, R. Lugo Leyte, & A. Torres, "Análisis exergoeconómico de una planta de cogeneración con turbina de gas considerando el proceso de formación del residuo," *CIBIM 10, Oporto, Portugal, 2011-CIBEM 10, Porto, Portugal, 2011*, pp. 1387–1392, Mar. 2016. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/279657120_Analisis_exergoeconomico_de_una_planta_de_cogeneracion_con_turbina_de_gas_considerando_el_proceso_de_formacion_del_residuo
- [14] Sanjay, & B.N. Prasad, "Energy and exergy analysis of intercooled combustion-turbine based combined cycle power plant". *Energy*, vol. 59, pp. 277–284, 2013. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.051>.
- [15] E. Açıkkalp, H. Aras, & A. Hepbasli, "Advanced exergy analysis of an electricity-generating facility using natural gas," *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 146-153, 2014. Retrieved from: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.006>.
- [16] D. Sanz Amaya, "Análisis y Optimización exérgica de una planta de Cogeneración para la Industria Azucarera," Tesis maestría, Facultad Ingeniería Mecánica, Universidad Pedagógica de Pereira, Pereira, 2014.
- [17] A.M. Elsafi, "Exergy and exergoeconomic analysis of sustainable direct steam generation solar power plants," *Energy Conversion and Management*, vol.103, pp. 338-347, October, 2015 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.066>.
- [18] Y. A., Cengel, & M.A. Boles, *Termodinámica*, 7th. ed. México D.F.: McGraw-Hill Companies. Inc.

2011, pp. 1456. Disponible: <http://es.slideshare.net/nomarzedlav/termodinamica-7ma-edicion-yunus-a-cengel-michael-a-boles>

- [19] Y.A. Carranza Sánchez, & S. de Oliveira Jr., "Exergy analysis of offshore primary petroleum processing plant with CO₂ capture," *Energy*, vol. 88, pp. 46–56, August, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.130>.
- [20] I. Dincer, & M.A. Rosen, "Chapter 12 – Exergy Analysis of Steam Power Plants,". In *Exergy*, 2th. ed. Elsevier, 2013, pp. 261–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00012-7>.
- [21] Y.A. Cengel, & A.J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa, Fundamentos y aplicaciones*, 4th. ed. Ciudad de Mexico: McGrawHill, 2012.
- [22] N. Fonseca, Engineering Equation Solver (EES, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2016. Retrieved from: http://www.academia.edu/9414760/Engineering_equation_solver_EES

SISTEMA DE GESTIÓN ISO 9001-2015: TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA DE CALIDAD PARA SU IMPLEMENTACIÓN

Management system ISO 9001-2015: techniques and tools of quality engineering for the implementation

Fanny Liliana Cruz Medina¹, Andrea del Pilar López Díaz¹, Consuelo Ruiz Cardenas²

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Maestría en Ingeniería, Colombia.
Email: fanny.cruz@uptc.edu.co

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Maestría en Ingeniería, Colombia.
Email: andrea.lopez03@uptc.edu.co

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Escuela de Ingeniería Industrial, Colombia.
Email: Consuelo.ruiz@uptc.edu.co

(Recibido agosto 26 de 2016 y aceptado diciembre 13 de 2016)

Resumen

El presente artículo muestra una evolución de la calidad en función de la normatividad existente en busca de mejora de procesos, además, como las normas ISO 9000 impactan en el mejoramiento continuo de las organizaciones optimizando los productos ofrecidos al consumidor final. De igual forma el análisis de como la ingeniería de calidad realiza los aportes necesarios en la generación de técnicas y métodos de implementación para seguimiento y control de procesos basados en estadísticas y modelos matemáticos útiles para reducción de costos, reducción de tiempos y mejora de calidad de vida de los empleados, finalmente se realiza un interrelacionar de los requisitos de los que trata la norma ISO 9001:2015 y las herramientas que desde la perspectiva de la ingeniería de la Calidad se pudieran aplicar a fin de garantizar el éxito y sostenibilidad de un Sistema de Gestión Calidad en una organización ya sea de bienes o servicios.

Palabras clave: ingeniería de calidad, sistema de gestión de la calidad, control estadístico, mejora de la calidad.

Abstract

This article shows an evolution of quality management system according to the existing regulations in search process improvement, as well as the ISO 9000 standards impact on continuous improvement of organizations by optimizing the products offered to the final consumer. Similarly analysis and quality engineering makes the necessary inputs in the generation of technical and implementation methods for monitoring and control based on statistics and mathematical models useful for cost reduction, reduction of time and quality improvement processes lives of employees, finally a interrelate with the requirements of ISO 9001:2015 that is standard and tools from the perspective of quality engineering could be applied to ensure the success and sustainability of a system is carried out Quality Management in an organization either goods or services.

Key words: Quality Engineering, Management Systems Quality, statistical Control, quality improvement.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de la calidad se manifiesta desde la antigüedad, por ejemplo en la construcción de las pirámides de Egipto, en donde la calidad se veía reflejada en la perfección con la que cada piedra fue cortada

y encajaba con las otras, hasta formar la compleja estructura piramidal. En la época artesanal, la calidad se concibe como el cumplimiento de los requerimientos establecidos para la personalización de los productos que son manufacturados por expertos maestros. Luego, en la primera mitad del siglo XX con la aparición de las teorías

Cómo citar este artículo:

F.L. Cruz-Medina, A. López-Díaz & C. Ruiz- Cárdenas, "Sistema De Gestión ISO 9001-2015: Técnicas Y Herramientas De Ingeniería De Calidad Para Su Implementación", *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 59-69, Enero, 2017.

de Taylor y Ford el concepto de calidad es traducido al concepto de inspección total al final de la línea, donde se verifica que el producto sea capaz de desempeñarse según lo planeado por el diseñador y satisfaga los requisitos de los clientes [1]. Cerca al año 1920, Walter Shewart definió la calidad desde dos enfoques, uno subjetivo y otro objetivo; en el segundo, hace referencia al control de la variación de las características de calidad de un producto que son medibles [2], Shewart impulsó la era moderna de la calidad al introducir el control estadístico, dando paso a la primera revolución de la calidad en Estados Unidos durante la segunda guerra mundial; la segunda revolución de la calidad se dio en el año 1950, cuando Williams Edwards Deming, Joseph Juran y Armand Feigenbaum fueron contratados por la Unión de ingenieros y científicos Japoneses (JUSE por sus siglas en inglés), para reconstruir a nivel industrial el caído imperio japonés e impulsar al país como potencia mundial; la tercera revolución se da a finales de 1970 e inicios de 1980, cuando el trabajo de Deming, Juran y Feigenbaum fue reconocido e implementado en Estados Unidos [3]. Deming, señala que la Calidad puede estar definida solamente en términos del agente; es decir de quien la juzgue, en la mente del operario, produce calidad si toma orgullo en su trabajo. La mala calidad, según este agente, significa la pérdida del negocio o de su trabajo. La buena calidad, piensa, mantendrá a la compañía en el negocio. Todo esto es válido en industrias de bienes y servicios. La calidad para el gerente de planta significa obtener las cifras resultantes y conocer las especificaciones. Su trabajo es también el mejoramiento continuo de los procesos y liderazgo [4]; por otro lado Juran estableció que calidad es "adecuación al uso" [5], mientras que Feingebaumg definió un concepto mucho más amplio introduciendo el término calidad total; para quien el objetivo es satisfacer al cliente, y la forma de lograrlo es la mejora continua de la calidad [6].

De otro lado, conforme las organizaciones empezaron a integrar principios de calidad en sus sistemas administrativos, se volvió popular la idea de una gestión o administración de la calidad total o TQM (Total Quality Management, TQM). Más que una disciplina técnica estrecha basada en la ingeniería o la producción, la calidad asumió un nuevo papel que permeó cada aspecto en el funcionamiento de una empresa [1]. A partir de estos diferentes enfoques han surgido varias metodologías como los círculos de calidad total, la reingeniería de procesos, Seissigma, manufactura esbelta, leansigma, entre otras, basadas en técnicas

estadísticas y avances en las ciencias conductuales, con el propósito de mejorar la productividad de las empresas [7]. En la década de 1990, especialmente en la industria automotriz se continuo con el énfasis de la calidad, dando lugar a la aparición de la hoy conocida norma ISO 9001 como modelo mundial para los sistema de gestión de la calidad [8]. Esta norma fue creada y adoptada por la Organización Internacional de Normalización (ISO por su sigla en inglés) con el fin de estandarizar los requisitos de calidad para los países europeos dentro del Mercado Común y para quienes querían hacer negocios con esos países, en 1987 [1]. La norma ha sido revisada en 1994, en el año 2000, y nuevamente en el año 2008; en el mes de septiembre del año 2015 la ISO, ha publicado la versión más reciente de esta norma, la cual establece los requisitos para un sistema de gestión de la calidad que puede ser utilizado por cualquier organización, grande o pequeña, independientemente de su campo de acción. Esta norma se basa en una serie de principios de gestión de calidad, incluyendo una fuerte orientación al cliente, la motivación y la implicación de la alta dirección, el enfoque de procesos y la mejora continua. El uso de la norma ISO 9001: 2015 ayuda a asegurar que los clientes obtengan productos consistentes y de buena calidad y servicios, que a su vez trae muchos beneficios para el negocio [9].

Dado lo anterior, el objetivo fundamental de este artículo es desarrollar una revisión de literatura con el fin de determinar cuáles herramientas de la ingeniería de la calidad deberían tenerse en cuenta en los diferentes criterios establecidos en el sistema de gestión de la calidad de la norma ISO 9001:2015, para dar cumplimiento a los propósitos empresariales de mejorar los procesos y lograr la satisfacción de las partes interesadas en la gestión organizacional de la calidad. En la segunda sección se presentaran los resultados de la revisión respecto a los conceptos y la evolución de la ingeniería de la calidad, llegando luego a la identificación de las herramientas de ingeniería de la calidad, en la tercera sección se describirán la conceptualización y estructura del sistema de gestión de la calidad bajo los parámetros de la norma ISO 9001:2015, para lograr en la cuarta parte establecer la relación entre cada numeral de la norma con las diferentes herramientas que pudieran ser aplicadas por cualquier organización. En la parte final se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones para investigaciones posteriores.

2. INGENIERA DE LA CALIDAD

La ingeniería de la calidad es una disciplina que consiste en una serie de técnicas cuantitativas para optimizar productos y procesos de manufactura, creando diseños consistentes o robustos al mínimo costo posible, estos es, diseños afectados mínimamente por fuentes de variabilidad externas o ruidos, las cuales pueden ser de tres tipos: interno por deterioro del producto, externo, causado por el medio ambiente, o por factores humanos, y ruido entre productos o imperfecciones en manufactura [10]; También, en [11], se encuentra una síntesis sobre la aplicación de las técnicas de ingeniería de calidad aplicadas en el diseño de productos, desde lo local hasta un enfoque global, incluyendo estudios de (Clausing,1990), (Lin,1990), (Nelson y Winter ,1992),(Hammer y Champy, 1993), (Towner ,1994), (Kackar ,1995), (Box,1996), (Wu,1997), (Ross,1998), (Arthur,1999), (Simón ,1999),(Loasby ,1999), (Hodgson ,1999), entre otros, dando como conceptualización general que la ingeniería de la calidad es el conjunto de actividades para diseñar, mejorar y optimizar procesos, productos y servicios, disminuyendo el tiempo de ciclo, la variabilidad y los costos, con el objetivo de ofrecer lo mejor al mercado.

El control de la calidad, según las Normas Industriales Japonesas, se define como, “Sistema de métodos para la provisión coste-eficaz de bienes o servicios cuya calidad es adecuada a los requisitos del comprador [12]. El control de la calidad según [13] se define como: “el desarrollo, diseño, producción, comercialización y prestación del servicio de productos y servicios con una eficacia del coste y una utilidad óptimas” de tal forma que los clientes comprarán con satisfacción. Para alcanzar estos fines, todas las partes de una empresa (alta dirección, oficina central, fábricas y departamentos individuales tales como producción, diseño, técnico, investigación, planificación, investigación de mercado, administración, contabilidad, materiales, almacenes, ventas, servicio, personal, relaciones laborales y asuntos generales) tienen que trabajar juntos. Todos los departamentos de la empresa tienen que empeñarse en crear sistemas que faciliten la cooperación y en preparar y poner en práctica fielmente las normas internas. Esto sólo puede alcanzarse por medio del uso masivo de diversas técnicas tales como los métodos estadísticos y técnicos, las normas y reglamentos, los métodos computarizados, el control automático, el control de instalaciones, el control de medidas, la investigación

operativa, la ingeniería industrial y la investigación de mercado”. [14], Define como el proceso de gestión universal para la realización de operaciones con el fin de proporcionar estabilidad para evitar cambio adverso y así lograr mantener el status quo”, para mantener la estabilidad, el proceso de control de calidad evalúa el desempeño real, se compara el rendimiento real de los objetivos, y toma una decisión sobre el diferencia.

En 1966, Taguchi introduce el concepto de control estadístico de la Calidad en todo el proceso productivo, realizando así una serie de trabajos en cuanto al control de la producción. En 1984, a raíz del desempeño como consultor de Taguchi, se introduce el término “Método Taguchi”, el cual consiste en la aplicación de la función de pérdida que mide los costos de la no calidad asumidos por el consumidor. Este concepto llevó a señalar que la Ingeniería de calidad implica la ingeniería del diseño, operaciones de proceso, servicios post ventas, economía y estadística [15], por lo cual sus actividades están enfocadas en la reducción de las pérdidas causadas por la variación, mientras que el control de calidad total consiste esencialmente en desarrollar, controlar y garantizar la calidad de los productos y servicios [16].

Entonces la ingeniería de calidad es atribuida, como técnica al Dr. Genichi Taguchi [17], quien ha desarrollado el concepto desde 1957, cuando realizó una publicación de diseño de experimentos donde propuso la formulación de una matriz ortogonal para la comprobación de experimentos y encontrar así variables clave a lo que el denominó diseño robusto. La ingeniería robusta según [18], es una de las herramientas para la mejora y creación de procesos y productos fiables que se ha mostrado más dinámica desde su definición por el Doctor Taguchi como superación de los anteriores métodos de Diseño de Experimentos. El aspecto al cual se dirige la actividad básica de la ingeniería robusta, es a conseguir productos cuyo diseño los haga menos sensibles a los diversos aspectos que no se puedan controlar y no precisamente extremando los niveles de exigencia en la calidad de las materias primas ni sobredimensionando los cálculos resistentes, sino al contrario, buscando mantener el menor costo y la mayor competitividad.

Otra definición es la Hansen [19], donde denomina control de calidad al conjunto de técnicas y procedimientos de que se sirve la dirección para orientar, supervisar y controlar todas las etapas mencionadas

hasta la obtención de un producto de la calidad deseada, para él, el control de calidad representa una inversión que, como cualquier otra, debe producir rendimientos adecuados que justifiquen su existencia.

La Ingeniería de calidad es una ciencia interdisciplinaria que se ocupa no sólo de producir productos satisfactorios para los clientes, sino también la reducción de la pérdida total, es decir producir productos de alta calidad a través de un proceso también de calidad [15]. La incertidumbre de los procesos es un aspecto que todas las empresas desean reducir a través de la buena toma de decisiones basadas en procesamiento de datos e información recolectada del sistema empresarial cuya unidad estadística puede ser el proceso productivo o la empresa en su conjunto, con buena información se pueden hacer estudios y análisis de futuro y mejorar los servicios y productos a corto plazo. Según un concepto básico de la gestión de calidad; las decisiones que se tomen sobre el sistema de gestión y sus procesos serán tan buenos como las mediciones que se realicen [20].

Es aquí donde el uso de técnicas estadísticas a través de los años ha ido tomando fuerza para la mejora continua de los sistemas operacionales permitiendo que a través de los procesos de manufactura se ofrezcan productos fabricados más competitivos [21], al operar bajo principios de cero errores desde el comienzo hasta el final del proceso. La medición de la calidad es efectiva solo cuando se realiza de tal manera que produzca información que la gente pueda entender y utilizar [22], en conexión con esta afirmación, se encuentra un Informe Técnico, ISO/TR 10017, cuyo objeto es ayudar a una organización a identificar las técnicas estadísticas que le puedan ser útiles en el desarrollo, implementación, mantenimiento y mejora de un sistema de gestión de la calidad, en cumplimiento con los requisitos de la Norma ISO 9001 y la Norma ISO 9004.

En dicho informe se relaciona la Estadística descriptiva, Diseño de experimentos, Prueba de hipótesis, Metrología, Análisis de la capacidad de proceso, Análisis de regresión y Análisis de confiabilidad Muestreo, Gráficos de control estadístico de proceso (CEP), Fijación de tolerancias estadísticas y Análisis de series de tiempo [23].

En [24], el autor plantea tres niveles de complejidad, en el primero se enuncian los métodos estadísticos elementales, en el segundo los métodos intermedios

y en el tercer nivel métodos avanzados. Los métodos estadísticos elementales, también llamadas siete herramientas son: cuadro de Pareto, diagrama causa efecto, estratificación, hoja de verificación, histograma, diagrama de dispersión, gráficas y cuadros de control. En cuanto a los métodos estadísticos intermedios, se incluyen la teoría del muestreo, la inspección estadísticas por muestreo, diversos métodos de realizar estimaciones y pruebas estadísticas, métodos de utilización de pruebas sensoriales y métodos de diseño de experimentos. De manera similar, los métodos estadísticos avanzados, corresponden al uso de software y computadores para el desarrollo de diseño de experimentos, análisis multivariable y diversos métodos de investigación de operaciones.

En [11], el autor sugiere herramientas de la ingeniería de la calidad aplicados al diseño del producto, tales como Diseño concurrente (DC), Despliegue de la Función de Calidad, análisis del Valor (AV), control estadístico el Proceso (CEP) y análisis de modo de efecto de falla (AMEF).

Todos estos métodos y herramientas son útiles a la hora de establecer, implementar y mantener los sistemas de Gestión de Calidad, ya que tocan todos y cada uno de la factores de la cadena de valor del proceso productivo pasando por la satisfacción de necesidades y expectativas de todos los interesados o mejor conocidos como los *stakeholders*. Estas herramientas desagregan los objetivos de los sistemas de Gestión basados en las normas de la familia ISO 9000, las cuales corresponden al conjunto de estándares de calidad que prescriben buenas prácticas de calidad [25], este conjunto de normas internacionales que establecen lineamientos, directrices y modelos para la implementación de Sistemas de Gestión de la Calidad, pero que no determinan cómo las empresas deben de obtenerlas [26], es decir, las normas exponen los requisitos que se deben cumplir, en una organización para una certificación en calidad, y las herramientas de la ingeniería de calidad y mejora continua aportan el cómo. La ventaja de las herramientas es que pueden identificar los efectos de los procesos que causan la variabilidad y que resultan en errores y mala calidad; estos pueden determinar de forma fiable la variabilidad anómala en el proceso y contribuir así a mejorar la calidad [27].

3. SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD ISO 9001:2015

Las normas de sistema de gestión ISO, proporcionan un modelo a seguir para establecer y operar un sistema de gestión, modelo que es construido en consenso internacional, obteniendo como ventaja la experiencia mundial de gestión y las buenas prácticas [28]. La familia de normas ISO 9000, trata diversos aspectos de la gestión de la calidad y proporcionan orientación y herramientas para las empresas y organizaciones que quieren asegurarse de que sus productos y servicios cumplen consistentemente con los requerimientos del cliente, y que la calidad se mejora constantemente. Esta familia de normas incluye la norma ISO 9000, la norma ISO 9001, ISO 9004 y la norma ISO 19011. Actualmente la norma ISO 9000 en versión 2015 presenta los principios, términos y definiciones básicas de la calidad, la norma ISO 9001:2015 establece los requisitos de un sistema de gestión de la calidad, siendo este el único estándar certificable de la familia ISO 9000, de igual manera la norma ISO 9004: 2009, se centra en cómo hacer que un sistema de gestión de calidad más eficiente y eficaz, por su parte la norma ISO 19011: 2011, presenta una guía sobre las auditorías internas y externas de los sistemas de gestión [28].

Un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) basado en la norma ISO 9001, proporciona una base sólida para la construcción de un programa de Gestión total de la calidad (TQM por sus siglas en inglés), siendo este estándar, el primer gran paso en la implementación de un programa TQM, facilitando el camino hacia la mejora continua [29]. En la norma ISO 9000:2015, se define el sistema de gestión de la calidad como el conjunto de elementos de una organización que están interrelacionados o que interactúan para establecer políticas, objetivos, y procesos de calidad para alcanzar dichos objetivos de calidad [30]. El sistema de gestión de calidad se encuentra enmarcado en siete principios fundamentales: 1) el enfoque al cliente, 2) el liderazgo, 3) el compromiso de las personas, 4) el enfoque en procesos, 5) la mejora, 6) la toma de decisiones basada en la evidencia, y 7) la gestión de las relaciones [30]. En la figura No 1, se muestra la estructura de la Norma ISO 9001:2015 con relación al ciclo PHVA: Planificar – Hacer – Verificar – Actuar.

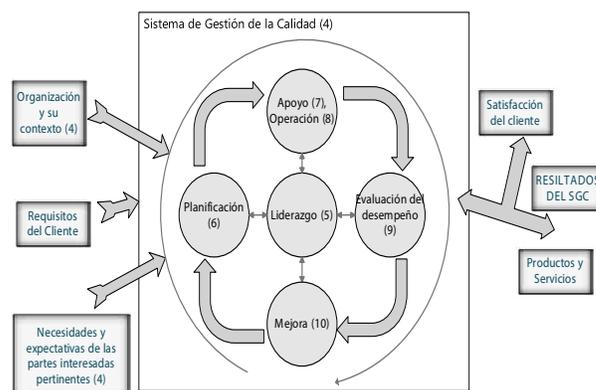


Figura No 1. Estructura de la Norma ISO 9001:2015 con relación al ciclo PHVA. Fuente: [31]

En [31], se incluyen cambios como la definición de la estructura de alto nivel, con el fin de lograr la alineación con otros sistema de gestión y se da una mayor relevancia a la gestión del riesgo teniendo en cuenta los principios y el proceso establecido en la NTC ISO 31000, en cuanto a la identificación del riesgo y la determinación de acciones para abordar los riesgos [32]; se determina una nueva ordenación del sistema de gestión de la calidad ISO 9001, la cual plantea diez numerales a tener en cuenta. Del numeral 1 al 3 se encuentra: 1) el alcance, 2) las referencias normativas y 3) la referencia a términos y definiciones de la norma ISO 9000:2015. Los numerales 4 al 10 presentan los requisitos o criterios a establecer, implementar y mantener en el sistema de gestión de la calidad de cualquier organización. A continuación en la tabla 1, se presentan y explican dichos numerales:

Tabla 1. Requisitos cuatro al ocho de la Norma ISO 9001:2015.

| NUMERAL | DESCRIPCIÓN |
|---------------------------------|---|
| 4) Contexto de la organización: | La organización debe determinar las cuestiones internas y externas, las partes interesadas, los requisitos de tales partes interesadas así como el alcance y el sistema de gestión de la calidad y sus procesos. |
| 5) Liderazgo: | La organización debe demostrar el liderazgo y compromiso con el SGC a través de la rendición de cuentas, comprendiendo e impulsando el enfoque al cliente, estableciendo y comunicando la política de calidad y definiendo roles, responsabilidades y autoridades en la organización. |
| 6) Planificación: | Describe requisitos a cumplir en cuanto a la definición de las acciones para abordar riesgos y oportunidades, los objetivos de la calidad y la planificación para lograrlos y la planificación de los cambios |

| NUMERAL | DESCRIPCIÓN |
|------------------------------|--|
| 7) Apoyo: | Presenta los criterios en los cuales la organización debe determinar y proporcionar los recursos necesarios para el establecimiento, implementación, mantenimiento y mejora continua del SGC, tales recursos deben considerar las personas, la infraestructura, el ambiente para la operación de los procesos, los recursos de seguimiento y medición y los conocimientos de la organización; este numeral Incluye además la determinación y aseguramiento de la competencia, la toma de conciencia, la comunicación y la creación y control de la información documentada |
| 8) Operación: | Se concentra en las acciones para la planificación, implementación y control de los procesos para la provisión de productos y servicios, a través de la planificación y control operacional, de la comunicación, determinación y revisión de los requisitos para los productos y servicios, el diseño y desarrollo de los productos y servicios, el control de los procesos, productos y servicios suministrados externamente, la producción y la provisión del servicio, la liberación de los productos y servicios y el control de las salidas no conformes. |
| 9) Evaluación del desempeño: | Incluye los criterios para realizar seguimiento, medición, análisis y evaluación al SGC, a sus procesos, productos y servicios, de igual forma señala la determinación del proceso de auditoría interna y de revisión por la dirección. |
| 10) Mejora: | Busca que la organización determine y seleccione las oportunidades de mejora e implemente cualquier acción necesaria para cumplir los requisitos del cliente y aumentar la satisfacción del cliente, a través de la determinación de acciones de corrección y la identificación de No conformidades y acciones correctivas, así como la mejora continua de la conveniencia, adecuación y eficacia del sistema de gestión de la calidad. |

A pesar que la certificación en la norma ISO 9001:2015, se entiende que debería ser un paso inicial hacia otras estrategias de calidad total, por sí sola la certificación no parece contribuir a las mejoras en los resultados

empresariales [33], por otro lado [26], plantean que la norma ISO es un conjunto de estándares de calidad que establecen buenas prácticas de calidad, sin embargo este modelo no determina cómo las empresas deben establecerlas e implementarlas, por lo que se argumenta la necesidad de que exista una fuerte cultura de calidad en la empresa certificada para que esta iniciativa implique mejoras en los resultados empresariales [34]. De allí que se plantea la necesidad de estudiar y analizar con mayor profundidad el área de la ingeniería de la calidad, con el fin de identificar y alinear herramientas apropiadas para la creación de la cultura de la calidad en una organización que implemente el sistema de gestión de la calidad bajo la norma ISO 9001:2015

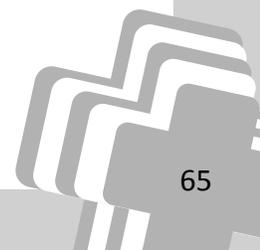
4. INGENIERIA DE LA CALIDAD APLICABLE AL ÉXITO DE LOS SISTEMAS DE GESTION LA CALIDAD ISO 9001:2015

Luego de la revisión de la evolución de la calidad, el alcance de los Sistemas de Gestión Calidad, y de la Ingeniería de la Calidad, se dedicará esta sección a interrelacionar los requisitos de los que trata la norma ISO 9001: 2015 en sus numerales 8. Operación, 9. Evaluación de Desempeño y 10. Mejora Continua, y las herramientas que desde la perspectiva de la ingeniería de la Calidad se pudieran aplicar a fin de garantizar el éxito y sostenibilidad de un Sistema de Gestión Calidad en una organización ya sea de bienes o servicios. Es importante señalar, que para efectos de este artículo se toman únicamente los numerales 8, 9 y 10 de la norma ISO 9001:2015, dado que se puede evidenciar una mayor necesidad de uso de datos cuantitativos para su gestión.

En la tabla 2. Se presenta la correspondencia entre numerales de la norma ISO 9001:2015 y herramientas estadísticas, tomando como referencia los criterios establecidos en el informe técnico ISO/TR 10017/2003. Orientación para el uso de técnicas estadísticas, las herramientas definidas por Kauro Ishikawa en su libro ¿Qué es el control total de la calidad?, y otros autores.

Tabla 2. Correspondencia entre los numerales de la norma ISO 9001:2015 y las técnicas y herramientas de Ingeniería de Calidad.

| Numeral ISO 9001:2015 | Técnicas/Herramientas Ingeniería de Calidad |
|--|--|
| 8. Operación | |
| 8.1. Planificación y control operacional: La organización debe planificar, implementar y controlar los procesos necesarios para cumplir los requisitos para la provisión de productos y servicios, y para implementar las acciones determinadas en la planificación. | Despliegue de la función de la calidad (QFD), Análisis de Modo de Efectos y Fallos (AMEF), Muestreo e inspección, hojas de verificación, cartas de control, series de tiempo. |
| 8.2. Requisitos para los productos y servicios: Incluye los requisitos con la comunicación con el cliente, la determinación, revisión y cambios de los requisitos para los productos y servicios, | QFD, metrología, análisis de la capacidad del proceso, muestreo, fijación de tolerancia estadística, hoja de verificación. |
| 8.3. Diseño y desarrollo de los productos y servicios: La organización debe establecer, implementar y mantener un proceso de diseño y desarrollo que incluya la planificación, las entradas, los controles, las salidas y los cambios del diseño y desarrollo. | QFD, AMEF, diseño de experimentos, prueba de hipótesis, metrología, análisis de regresión, análisis de confiabilidad, muestreo, simulación, análisis de series de tiempo, Diseño Concurrente, Análisis de Valor, hoja de verificación. |
| 8.4. Control de los procesos, productos o servicios suministrados externamente: La organización debe asegurarse de que los procesos, productos y servicios suministrados externamente son conformes a los requisitos, determinando el tipo y alcance del control y la información para los proveedores externos. | Muestreo, Inspección, análisis de la calidad del proceso, prueba de hipótesis; metrología; análisis de regresión; análisis de confiabilidad; diseño de experimentos, hoja de verificación, diagrama de Pareto. |
| 8.5. Producción y provisión del servicio: La organización debe implementar la producción y provisión del servicio bajo condiciones controladas, debe utilizar los métodos apropiados para la identificación y trazabilidad de los productos y servicios, debe cuidar la propiedad perteneciente al cliente, debe preservar las salidas durante la producción y prestación del servicio, debe cumplir los requisitos para las actividades posteriores a la entrega asociadas con los productos y servicios, y debe controlar los cambios para la producción y prestación de servicios. | Investigación de Operaciones, metrología, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión; análisis de confiabilidad, muestreo, gráficos de Control Estadístico de Proceso, análisis de series de tiempo, hoja de verificación. |
| 8.6. Liberación de productos y servicios: La organización debe implementar las disposiciones planificadas, en las etapas adecuadas, para verificar que se cumplen los requisitos de los productos y servicios. | Metrología, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, muestreo, gráficos de Control Estadístico de Proceso, fijación de tolerancias estadísticas, análisis de series de tiempo, inspección, |
| 8.7. Control de los procesos no conformes a productos y servicios: La organización debe asegurarse de que las salidas que no sean conformes con sus requisitos se identifican y se controlan para prevenir su uso o entrega no intencionada, y mantener información documentada de la no conformidad, las acciones tomadas, las concesiones obtenidas y la autoridad que decide la acción frente a la no conformidad. | Inspección, muestreo, histograma, diagrama e Ishikawa, diagrama de Pareto, graficas de dispersión, diseño de experimentos, prueba de hipótesis, metrología, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, análisis de confiabilidad, gráficos de Control Estadístico de Procesos; análisis de series de tiempo, hoja de verificación. |
| 9. Evaluación del desempeño | |
| 9.1. Seguimiento, medición, análisis y evaluación: La organización debe determinar qué necesita seguimiento y medición, los métodos de seguimiento, medición, análisis y evaluación necesarios para asegurar resultados válidos., debe realizar el seguimiento de las percepciones de los clientes del grado en que se cumplen sus necesidades y expectativas. La organización debe analizar y evaluar los datos y la información apropiados que surgen por el seguimiento y la medición. | Diseño de experimentos, prueba de hipótesis, metrología, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, análisis de confiabilidad, muestreo, gráficos de Control estadístico de procesos, análisis de series de Tiempo, indicadores. |
| 9.2. Auditoría interna: La organización debe llevar a cabo auditorías internas a intervalos planificados para proporcionar información acerca de si el SGC es conforme a los requisitos de la organización y de la norma y se implementa y mantiene. | Muestreo, estadística descriptiva, hoja de verificación. |
| 9.3. Revisión por la dirección: La alta dirección debe revisar el SGC a intervalos planificados para asegurarse de sus conveniencia, adecuación, eficacia y alineación continuas de las dirección estratégica de la organización. | Análisis de la capacidad del proceso, muestreo, gráficos de Control estadístico de procesos, hoja de verificación, histograma, diagrama de Pareto. |



| Numeral ISO 9001:2015 | Técnicas/Herramientas Ingeniería de Calidad |
|---|---|
| 10. Mejora | |
| 10.1. Generalidades: La organización debe determinar y seleccionar las oportunidades de mejora e implementar cualquier acción necesaria para cumplir los requisitos del cliente y aumentar la satisfacción del cliente. | Diseño de experimentos, prueba de hipótesis, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, muestreo; gráficos de control estadístico de procesos, análisis de series de tiempo. |
| 10.2. No conformidades y acciones correctivas: Cuando ocurra una no conformidad, incluidas las originadas por las quejas, la organización debe reaccionar a la no conformidad y cuando sea aplicable tomar acciones para controlarla, corregirla y hacer frente a las consecuencias. | Diseño de experimentos, prueba de hipótesis, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, muestreo; gráficos de control estadístico de procesos, análisis de series de tiempo. Diagrama Causa Efecto, Diagrama de Pareto, histograma, hoja de verificación. |
| 10.3. Mejora continua: La organización debe mejorar continuamente la conveniencia, adecuación y eficacia del SGC. | Diseño de experimentos, prueba de hipótesis, análisis de la capacidad del proceso, análisis de regresión, muestreo; gráficos de control estadístico de procesos, análisis de series de tiempo. Diagrama Causa Efecto, Diagrama de Pareto, histograma. |

5. RESULTADOS

Teniendo en cuenta el principio de Operación por procesos se hace indispensable controlar la producción y validar los procesos, con el fin de determinar los criterios y los métodos necesarios para asegurarse de que tanto la operación como el control de estos procesos sean eficaces. Además, la gestión de recursos se debe realizar con el fin de asegurar la disponibilidad de recursos e información necesarios para apoyar la operación y el seguimiento de estos procesos en pro de la gestión convenientemente de los productos no conformes, es decir, realizar el seguimiento y la medición cuando sea aplicable, para lo cual se pueden aplicar las siete herramientas de la calidad, estas comprenden: diagramas de Ishikawa que permiten determinar causas de los eventos de no calidad, hojas de registro para contabilizar la frecuencia de ocurrencia, los gráficos o cartas de control para verificar la estabilidad de los procesos, a la utilización de esta herramienta, [35] hace una contextualización para ajustar las cartas de control de acuerdo a las características de los procesos a partir de la perspectiva de autores como [36-39], quienes concuerdan en afirmar que los procesos no son tan ideales como lo muestra Shewhart ya que los métodos tradicionales de control estadístico pierden efectividad cuando se realizan pruebas con datos autocorrelacionados, en este trabajo se evidencia la aplicación de técnicas de muestreo, distribuciones de probabilidad y modelos de pronóstico para parametrizar procesos.

En cuanto a la planificación, diseño y desarrollo del producto se pueden utilizar, el Diseño concurrente (DC), esta es, según lo define [40], una metodología en la cual el diseño del producto y el proceso de fabricación

están interrelacionados donde se realizan todas las actividades de diseño de manera paralela, integrando los propósitos de factores tales como cliente, proceso, integración interna/externa, gestión, producción seguridad y comunicación, consecuente con esta, para la determinación de los requisitos y expectativas del cliente, se requiere del QFD, pues el despliegue de la Función de Calidad resulta una herramienta muy precisa en transformar las expectativas del cliente en especificaciones de ingeniería, este es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operativas satisfactorias, Según Michel Vigier, el QFD tiene como objetivo la obtención de una calidad de diseño excelente, mediante la conversión de las necesidades del cliente en características de calidad o “funciones de servicio” adecuadas, sin omisiones ni elementos superfluos[41], análisis del Valor (AV), esta metodología está enfocada en evaluar todas y cada una de las actividades que interviene en el procesos productivo a fin de establecer cuales aumentan valor y cuales solo aumentan costos[42], esto a partir control estadístico del Proceso (CEP) y análisis de modo de efecto de falla (AMEF) [11].

La Evaluación de desempeño, es realizar Seguimiento, medición del desempeño, análisis y evaluación tanto de los procesos como de la opinión del cliente, con el fin de Implementar las acciones necesarias para alcanzar los resultados planificados y la mejora continua de estos proceso, para esto, el diseño de experimentos puede contribuir a las síntesis de resultados, pues al analizar los cambios en el sistema bajo investigación y al evaluar estadísticamente el efecto se validan algunas características o se determina la influencia de uno o más

factores sobre algunas características de un proceso, sistema o bien a la organización.

Por otro lado, el desempeño de una empresa también está condicionado o restringido por la capacidad del sistema, por lo cual, partiendo de la perspectiva de [43], la capacidad productiva, su análisis, planeación, programación y control, constituyen actividades críticas que se desarrollan paralelamente con las actividades de programación y planeación de materiales, siendo la capacidad la cantidad de productos o servicios destinados a satisfacer las necesidades del cliente o de la sociedad que puede ser obtenida por una unidad productiva en un determinado periodo de tiempo; para este análisis se hace necesario identificar las capacidad técnica, económica, instalada y la disponible [44], los modelos enfocados a este fin en su mayoría son problemas de programación lineal [45], en donde, la investigación de operaciones en el análisis, planeación, programación, control y evaluación de los procesos .

La mejora constituye el punto del ciclo PHVA donde se toman decisiones alrededor de la mitigación de las causas de las fallas en el sistema, por ende, las herramientas de ingeniería de la calidad para dar cumplimiento del ultimo numeral de la ISO 9001:2015, son las mismas descritas para la operación y la evaluación del desempeño, ya que al tener cuantificadas las causas de la no calidad, lo que sigue es la formulación de estrategias que las minimicen o si es posible que las eliminen.

CONCLUSIONES

El diseño, implementación, mantenimiento y mejora de un sistema de gestión de calidad bajo los lineamientos de la norma ISO 9001:2015, requiere de manera necesaria el uso y aplicación de la ingeniería de la calidad y por supuesto de las herramientas técnicas estadísticas con el fin de lograr una real eficiencia y no solo un proceso documental de cumplimiento de requisitos.

Siendo la ingeniería de la calidad un área en constante evolución, queda el espacio abierto para realizar futuros análisis e investigaciones sobre las herramientas estadísticas y su aplicación directa en los numerales de la norma ISO 9001:2015.

De acuerdo a la revisión realizada, se plantean unas herramientas necesarias en la planificación y operación de

los procesos para la producción o prestación del servicio, tales como: el diseño de experimentos, la investigación de operaciones, la metrología y el análisis multivariado.

La evaluación de desempeño del sistema de gestión de calidad se hace más precisa con el uso de herramientas y técnicas de ingeniería de calidad, teniendo en cuenta que la recolección, el análisis y la evaluación de los datos se desarrolla bajo modelos y teorías aprobadas y reconocidas, permitiendo una eficiente toma de decisiones.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Evans, W.M. Lindsay, F.S. Fragoso, & G.H. Díaz, Administración y Control de la Calidad: Thomson, 2000.
- [2] W. A. Shewhart, Control económico de la calidad de productos manufacturados: Ediciones Díaz de Santos, 1997.
- [3] V.E. Sower, Essentials of quality with cases and experiential exercises: John Wiley & Sons, 2010.
- [4] W.E. Deming, & J.N. Medina, Calidad, productividad y competitividad: la salida de la crisis: Ediciones Díaz de Santos, 1989.
- [5] J.M. Juran, Juran y la planificación para la calidad: Ediciones Díaz de Santos, 1990.
- [6] A.V. Feigenbaum, M.A.G. De la Campa, M. A. G., & P. Sevilla, Control total de la calidad (Vol. 1): Continental, 1994.
- [7] A.J. Ruiz-Torres, J. Ayala-Cruz, N. Alomoto, & J.L. Acero-Chavez, "Revisión de la literatura sobre gestión de la calidad: caso de las revistas publicadas en Hispanoamérica y España", *Estudios Gerenciales*, vol. 31, n°. 136, pp. 319-334, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.estger.2015.01.004>.
- [8] D.H. Besterfield, & V.G. Pozo, Control de calidad: Pearson Educación, 2009.
- [9] ISO, I. O. f. S., *ISO 9000 - Quality management*, 2016. Disponible en: http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso_9000.htm
- [10] R.D.R. Bermúdez, "Ingeniería de calidad: robustez del proceso de urdido en una planta de likra por el método Taguchi," *Revista Universidad EAFIT*, vol. 29, n°89, pp. 33-41, 2012.
- [11] A. Zapata-Gómez, "Efecto de las técnicas de ingeniería de la calidad en el diseño de productos," *Revista Ingeniería y Universidad*, vol. 17, n° 2, pp. 409-425, 2013.
- [12] J.I.S. Committee, Japanese Industrial Standard. JIS K601, 1988.

- [13] K. Ishikawa, *Introducción al control de calidad*. España: Ediciones Díaz de Santos, 2007
- [14] A.B. Godfrey, *Juran's quality handbook*, 1999.
- [15] M. Cakmakci, N.M. Durakbasa, M.K. Karasu, G. Bas, & U. Gurel, The importance of quality control within the relationship between the quality engineering and Taguchi methodology. *Key Engineering Materials*, 637, 2014. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.637.27.
- [16] J.M. Juran, F.M. Gryna, & R.S. Bingham, *Manual de Control de la Calidad*: Reverté, 1983.
- [17] G. Taguchi, S. Chowdhury, & Y. Wu, *Taguchi's quality engineering handbook*: Wiley-Interscience, 2005.
- [18] I. F. D. Aguirre, "Introducción a la Ingeniería Robusta". *Dyna*, vol. 81, n° 5, pp. 29-32, 2006.
- [19] B. L. Hansen, & P.M. Ghare, *Control de calidad: teoría y aplicaciones*. España: Ediciones Díaz de Santos, 2008
- [20] J.D. Terán Ruales, *Implementación del sistema de gestión de aseguramiento y control de calidad en el departamento técnico para los productos y servicios DE COHECO SA*, 2014.
- [21] Hernández Pedrera, C., & Da Silva Portofilipe, F. (2016). Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de su calidad. *Tecnología Química*, 36(1), 104-116.
- [22] P. Crosby, P., *Reflexiones sobre calidad : 295 máximas del gurú mundial de calidad Philip Crosby*: McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- [23] ISO, I. O. f. S. ISO/TR 10017. *Orientación Sobre Técnicas Estadísticas*, 2003.
- [24] K. Ishikawa, *Qué es el control total de calidad?: la modalidad japonesa*: Editorial Norma, 1997.
- [25] J.B.D.I. Casas, "El ISO 9001 Y TQM en las empresas Latinoamericanas: Perú". *Globalización, Competitividad y Gobernabilidad de Georgetown/Universia*, 8,1, 2014. DOI: 10.3232/GCG.2013.V8.N1.04.
- [26] C. Chow-Chua, M. Goh, & T. Boon Wan, Does ISO 9000 certification improve business performance? *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 20, n° 8, pp. 936-953, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1108/02656710310493643>.
- [27] P. Gejdoš, "Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control". *Procedia Economics and Finance*, 34, 565-572, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01669-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01669-X).
- [28] ISO., I. O. f. S. *Management system standards*, 2016. from <http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards.htm>
- [29] P. Padma, L. Ganesh, & C. Rajendran, "A study on the critical factors of ISO 9001: 2000 and organizational performance of Indian manufacturing firms,". *International Journal of Production Research*, vol. 46 n° 18, pp. 4981-5011, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540600793299>.
- [30] ISO, I. O. f. S. *ISO 9000:2015 Quality management systems — Fundamentals and vocabulary*, 2015. from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>
- [31] ISO_9001, *ISO 9001:2015 Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos*. Colombia: ICONTEC, 2015
- [32] ISO_31000. *NTC ISO 31000. GESTIÓN DEL RIESGO. PRINCIPIOS Y DIRECTRICES*. Colombia: ICONTEC, 2011.
- [33] S.T. Meegan, & W.A. Taylor, "Factors influencing a successful transition from ISO 9000 to TQM: the influence of understanding and motivation,". *International Journal of Quality & Reliability Management*, 14(2), 100-117, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1108/02656719710165383>.
- [34] M.Terziovski, D. Samson, & D. Dow, The business value of quality management systems certification. Evidence from Australia and New Zealand. *Journal of operations management*, 15(1), 1-18, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(96\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(96)00103-9).
- [35] R.P. Niebles, Ó Oviedo-Trespalacios, J.G.V. Cabeza, & L.M.F. Cantillo, L. M. F., "Diseño estadístico de cartas de control para datos autocorrelacionados,". *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 31, n° 2, pp. 291-315, 2013.
- [36] D.C. Montgomery, & C.M. Mastrangelo, Some statistical process control methods for autocorrelated data. *Journal of Quality Technology*, vol. 23, n° 3, pp. 179-193, 1991.
- [37] T. Sukchotrat, S.B. Kim, & F.Tsung, "One-class classification-based control charts for multivariate process monitoring,". *IIE transactions*, vol. 42n° 2, pp. 107-120, 2009. DOI:<http://dx.doi.org/10.1080/07408170903019150>.
- [38] S. Vander Wiel, S., "Monitoring processes that wander using integrated moving average models,". *Technometrics*, vol 38, n° 2, pp. 139-151, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1996.10484459>.
- [39] N.F. Zhang, "A statistical control chart for stationary process data,". *Technometrics*, vol. 40, n° 1, pp. 24-38, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1998.10485479>.
- [40] R. Kinna, "Teamworking and concurrent engineering-a success story,". *World class design to manu-*

- facture*, vol. 2, n° 3, pp. 5-9, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1108/09642369310087048>.
- [41] E. Yacuzzi, & F. Martín, QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos: Serie Documentos de Trabajo, Universidad del CEMA: Área: negocios, 2003.
- [42] Fowler, T. C. (1990). *Value analysis in design*: CRC Press.
- [43] M. Dominguez, & A. Jose, *Dirección de Operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*: MCGRAW HILL, 1995.
- [44] D. Kalenatic, *Modelo integral y dinámico para el análisis, planeación, programación y control de las capacidades productivas en empresas manufactureras*: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, Instituto de Investigaciones Científicas, 2001.
- [45] D. Kalenatic, C.A.L. Bello, & L.J.G. Rodríguez, Modelo de Medición, Análisis, Planeación y Programación de Capacidades en un Contexto de Múltiples Criterios de Decisión. *Ingeniería*, 10(2), 57-66, 2005.

DESERCIÓN ESTUDIANTIL EN COLOMBIA Y LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA DE LA UPTC SECCIONAL SOGAMOSO

Student dropout in Colombia and the engineering programs of the Uptc campus Sogamoso

Oscar Iván Higuera Martínez¹

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Electrónica, Grupo de Investigación DSP UPTC, Colombia. Email: oscar.higuera@uptc.edu.co

(Recibido noviembre 15 de 2016 y aceptado diciembre 6 de 2016)

Resumen

Este artículo presenta un análisis de la deserción estudiantil en Colombia, inicialmente en las áreas de programas que posee la Uptc Sogamoso y finalmente enfocándose en los programas de Ingeniería de la sede, donde se revisan los datos reportados por SPADIES (Sistema para la Prevención de la Deserción en las Instituciones de Educación superior), y se realiza una descripción de los resultados reportados y algunas variables que influyen en la deserción en la Uptc Sogamoso.

Palabras clave: Deserción estudiantil, educación superior, ingeniería.

Abstract

This paper presents an analysis of student dropout in Colombia. Initially in the programs areas that Uptc Sogamoso has and finally focusing on the Engineering programs in the campus, where the data reported by SPADIES (System for the Prevention of Dropout in Institutions of Higher Education) are reviewed, and a description is made of the results reported and the some variables that influence the dropout in the Uptc Sogamoso.

Key words: Student dropout, higher education, engineering.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de las causas de deserción es una herramienta importante al momento de determinar las acciones que deben realizarse para aumentar la retención y graduación de los estudiantes en la educación superior en Colombia. El análisis de deserción y sus principales consecuencias es un trabajo que se realiza desde hace décadas en Colombia y Latinoamérica, muestra de ello son trabajos como [1], donde se presenta la deserción estudiantil en la educación superior de Colombia, una metodología de seguimiento, diagnóstico y elementos para su prevención, documento elaborado por el Ministerio de Educación Nacional de Colombia, y donde se brinda información sobre la situación a 2009 y presenta elementos útiles para el análisis y tratamiento de la deserción estudiantil en educación superior, a partir de una metodología implementada en el Sistema de Prevención de la Deserción en Educación Superior (SPADIES), en [2] se analiza las interpretaciones sobre

la deserción en la universidad colombiana. Las miradas sobre deserción se orientan a reflexionar y ofrecer mecanismos de intervención en las universidades, sin relacionarlo con la disminución del valor social de la educación superior.

En [3] se realizó una revisión sistemática para precisar las características del estrés académico que incide en la salud mental de la población universitaria. Donde se examinaron publicaciones sobre estrés académico, deserción estudiantil y estrategias de retención. Así como universidades que han realizado análisis a sus campus y programas como en [4], donde la Universidad de Antioquia presenta un análisis del problema en Colombia y un panorama general del fenómeno de la deserción en la Universidad de Antioquia, y se realiza un análisis descriptivo de las características sociodemográficas de la población. Otras Universidades que han realizado investigaciones sobre este tema son [5-10] donde se exploran desde conceptos de deserción, factores de

Cómo citar este artículo:

O.I. Higuera-Martínez, "Deserción estudiantil en Colombia y los programas de ingeniería de la UPTC seccional Sogamoso," *Rev. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17 N° 1, pp. 70-76, Enero, 2017

riesgo presentes, como casos de estudio puntual sobre la deserción en las diferentes instituciones de educación superior o programas analizados y formular variables a considerar para un adecuado seguimiento y diagnóstico.

Al momento de analizar los diferentes tipos de deserción, una de las características que más se observa es la determinada con respecto al tiempo, donde la deserción se divide en [11]: Deserción precoz: el individuo que, habiendo sido aceptado por la universidad, no se matricula; deserción temprana: aquel que abandona sus estudios en los primeros semestres de la carrera, en esta etapa es donde más se concentra la deserción, la cual está en el orden de un 75%; y deserción tardía: quien abandona los estudios en los últimos semestres, es decir, una vez cursados al menos la mitad de los semestres establecidos en el programa académico.

El Ministerio de Educación Nacional de Colombia creó El Sistema de Prevención de la Deserción en Educación Superior, SPADIES, que según el MEN “Es la herramienta para hacer seguimiento sobre las cifras de deserción de estudiantes de la educación superior. Con los datos suministrados por las instituciones de educación superior a SPADIES, se identifican y se ponderan los comportamientos, las causas, variables y riesgos determinantes para desertar. Además, con esta información se agrupan los estudiantes de acuerdo con su riesgo de deserción”, el cual está disponible en internet [15], es por esto que este sistema sirve y da información para analizar la deserción en cada institución de educación superior y poder tomar acciones al respecto, actualmente este sistema está instalado en el 99% de las Instituciones de educación superior y hace seguimiento a más de 3 millones de estudiantes.

2. DESERCIÓN NACIONAL

En el análisis de deserción nacional, se puede observar que en la Educación superior según lo muestran las estadísticas de SPADIES la mayor deserción se encuentra en los programas técnico y tecnológico, los cuales llegan al 62.18% y 59.53% respectivamente, y para la Educación Universitaria es de 44,93% en el 10 semestre, en la figura 1 se observa este comportamiento. Estos valores son similares a los reportados en el año 2013, donde la deserción en el nivel universitario alcanzó el 44.9%, y para el nivel técnico y tecnológico la deserción alcanzó niveles del 62.4% y el 53.8% respectivamente [12]. Lo cual hace reflexionar sobre ¿Que está pasando con

las políticas de disminución de la deserción estudiantil a nivel nacional? Pero adicional a estos datos, es de preocuparse que con respecto al origen de la institución, la deserción en las instituciones de carácter oficial en 10 semestre está en 49.03%, mientras las no oficiales están en 49.21%, y donde el promedio de la deserción por cohorte, periodo 1998 – 2007 estaba en 47 % para IES públicas y en 46 % para IES privadas [14].

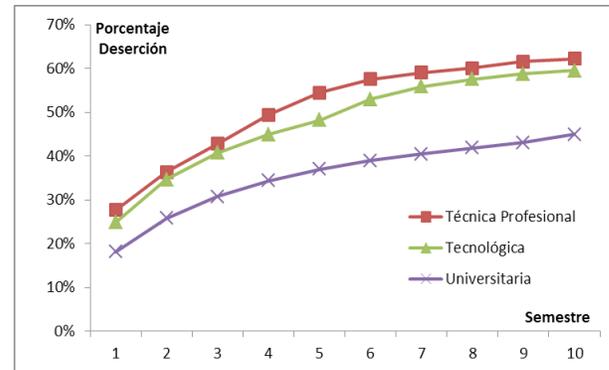


Figura 1. Estadísticas de deserción en educación superior por nivel de formación, [15].

Con respecto a la deserción en el departamento de Boyacá, y según los datos proporcionados por SPADIES, se logra observar que en el año 2008 era de 38.2% [13] y en el 2013 de 43.2% [12] y el actual (consulta en noviembre 15 de 2016) es de 45.14%, reportando un crecimiento proporcional al Nacional, lo cual indica que en Boyacá este índice también está en aumento, que si bien Boyacá está ubicado en la posición 9 de los índices de deserción más bajos, se debe revisar si los procesos que se están realizando en las universidades del departamento están siendo bien enfocados, en donde las instituciones oficiales reportan una deserción de 44.44%, mientras que las no oficiales de 46,77%.

En la Tabla 1 se observan las estadísticas de deserción nacional según diferentes criterios como ingreso de la familia del estudiante (IFE), clasificación examen de estado (CEE), trabajaba al presentar el ICFES (TPI) y el nivel educativo de la madre (NEM), donde como se esperaba, las características al momento de ingreso del estudiante al sistema de educación superior es influyente en la deserción, observando que se presenta menor deserción entre mayor es el ingreso del grupo familiar, y si está trabaja, lo cual incluye para consideración de parte de las IES una posible consecuencia de deserción no académica, así mismo el resultado de las pruebas de es-

tado determina que los estudiantes clasificados en bajo, tienen un riesgo (20%) mayor a los clasificados en alto, lo cual introduce un riesgo académico de deserción para estos.

Tabla 1. Deserción a 10 semestres considerando factores socio-económicos y de ingreso a la IES.

| Aspecto Considerado | | Deserción |
|---------------------|---|-----------|
| IFE | [0,1) salarios mínimos | 52.87% |
| | [1,2) salarios mínimos | 51.86% |
| | [2,3) salarios mínimos | 49.45% |
| | [3,5) salarios mínimos | 45.79% |
| | [5,7) salarios mínimos | 42.18% |
| | [7,10) salarios mínimos | 42.76% |
| | [10,) salarios mínimos | 38.67% |
| CEE | Bajo | 57.20% |
| | Medio | 47.24% |
| | Alto | 37.20% |
| TPI | No trabajaba | 48.24% |
| | Si trabajaba | 57.13% |
| NEM | Básica primaria o inferior | 53.05% |
| | Básica secundaria | 50.97% |
| | Media vocacional o técnica/ tecnológica | 46.58% |
| | Universitaria o superior | 42.49% |

[15]

3. DESERCIÓN EN LAS ÁREAS DE INGENIERÍA Y CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS

En cuanto a la deserción considerando las diferentes áreas de conocimiento, se observa que la más elevada se encuentra en el área de ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines con un 54,87%, (Ver tabla 2), pero a su vez en esta área se observa que la educación técnica profesional con un 73.17% es la más alta seguida de la tecnológica con un 64.41% y la universitaria con un 48.82%. Para el interés de este texto se considera la deserción en las áreas de ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines, y en economía, administración, contaduría y afines, por cuanto son en las áreas que se imparten los programas de pregrado en la Uptc Seccional Sogamoso. Tomando a nivel nacional en el nivel universitario en las áreas de interés, la deserción esta para economía, administración, contaduría y afines en 44.26% y en ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines de 48.82%.

Tabla 2. Deserción por área de conocimiento.

| Área de conocimiento | Sem 2 | Sem 4 | Sem 6 | Sem10 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Agronomía, veterinaria y afines | 33.25% | 42.99% | 49.02% | 54.38% |
| Bellas artes | 27.03% | 36.73% | 43.38% | 49.56% |
| Ciencias de la educación | 26.77% | 35.01% | 39.61% | 44.93% |
| Ciencias de la salud | 22.86% | 30.19% | 34.66% | 40.02% |
| Ciencias sociales y humanas | 23.78% | 31.29% | 35.48% | 42.44% |
| Economía, administración, contaduría y afines | 29.87% | 39.02% | 44.52% | 49.93% |
| Ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines | 31.90% | 42.42% | 48.79% | 54.87% |
| Matemáticas y ciencias naturales | 30.98% | 40.91% | 45.97% | 50.56% |

[15]

Las Instituciones oficiales presentan una mayor deserción solo considerando la Educación universitaria en las áreas de Economía, administración, contaduría y afines con 45.05% y en ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines con 50.85%, mientras las no oficiales en economía, administración, contaduría y afines con 43.79% y en ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines con 47.22%.

Considerando solo el departamento de Boyacá y el nivel de educación universitaria, en el área de ciencias económicas, el departamento se encuentra en el puesto 10 de 26 con una deserción por cohorte de 40,93, y en ingeniería de 7 de 27 con 44,32%, mostrando bajos indicadores de deserción en comparación con otros departamentos. En la Tabla 3 se puede apreciar la deserción por cohorte en décimo semestre en las diferentes sedes de la Uptc para las áreas de economía, administración, contaduría y afines, e ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines, se observa que la mayor deserción en estas áreas se presenta en Sogamoso.

Tabla 3. Deserción en décimo semestre en la sedes de la Uptc para las áreas de economía, administración, contaduría y afines, e ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines.

| Área de conocimiento | Sede | Des. |
|---|--------------|--------|
| Economía, administración, contaduría y afines | Duitama | 32.82% |
| | Tunja | 39.53% |
| | Chiquinquirá | 44.16% |
| | Sogamoso | 45.04% |
| Ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines | Tunja | 42.93% |
| | Duitama | 45.09% |
| | Sogamoso | 45.90% |

[15]

4. DESERCIÓN EN LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA DE LA UPTC SOGAMOSO

En esta sección se enfoca el análisis en la deserción en los programas de la Seccional Sogamoso de la Uptc, iniciando por una mirada general y enfocándose el análisis en los programas de ingeniería de la misma.

Como se observó en la tabla 3, la deserción en las áreas de economía, administración, contaduría y afines, está en 45,04, y en ingeniería, arquitectura, urbanismo y afines en 45,90, los cuales son inferiores a la deserción para las mismas áreas a nivel nacional, En la Figura 2 podemos detallar que el programa de ingeniería electrónica, posee la más alta deserción y los programas de ingeniería industrial y contaduría pública la menor deserción, y analizando todos los programas se logra determinar que en promedio en los 4 primeros semestres se tiene una deserción del 72,6% de la total generada hasta décimo semestre, que es la denominada deserción temprana, que es donde se ha concentrado el esfuerzo de reducir la deserción en la Uptc.

En las Figura 3 y 4 se puede observar la deserción por periodo, donde se está presentando una tendencia a la baja en la deserción por periodo académico, y esto es debido a las estrategias implementadas por la universidad para reducir la deserción, entre las cuales se tienen de tipo académicas, donde se rescata el plan padrino, el cual en la Sede es orientado por los docentes de las diferentes áreas donde se ha identificado debilidades por parte de los estudiantes, y los cursos intersemestrales. Y de tipo no académicas, donde se rescata la implementa-

ción desde hace algunos años de las becas por extrema incapacidad, residencias estudiantiles, becas deportivas, culturales y de trabajo en dependencias de la universidad, las cuales buscan ayudar a los estudiantes en la parte económica.

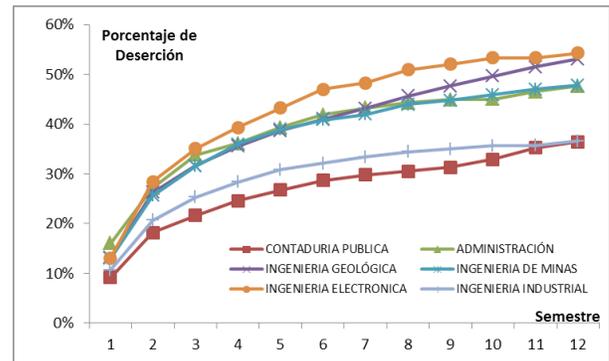


Figura 2. Estadísticas de deserción por cohorte programas Uptc Sogamoso, [15].

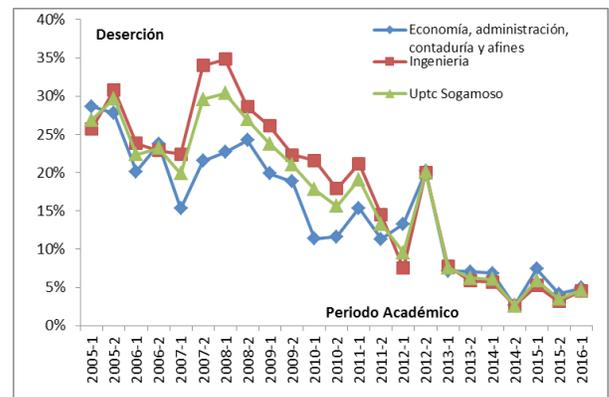
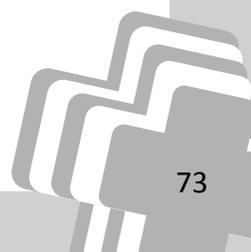


Figura 3. Estadísticas de deserción por periodo por área de conocimiento Uptc Sogamoso, [15].

Finalmente revisando la deserción en los programas de Ingeniería Uptc Sogamoso, con los programas de Ingeniería que están adscritos en el SNIES en la Uptc Sogamoso (código institución 1108), en la deserción por cohorte, como se mencionó anteriormente se tiene un comportamiento muy parecido en los programas de ingeniería de la seccional con respecto al área de ingeniería en Colombia, a excepción de ingeniería industrial, quien tiene una deserción inferior a los demás programas (Figura 5).



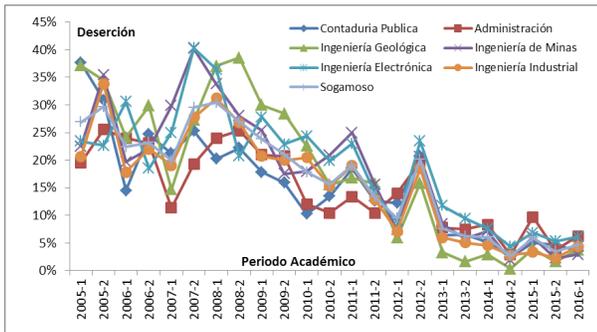


Figura 4. Estadísticas de deserción por periodo por programa académico Uptc Sogamoso, [15].

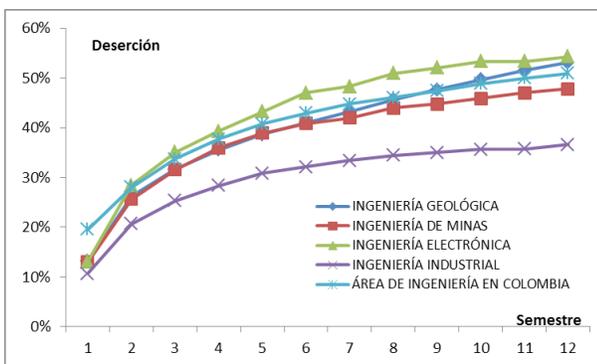


Figura 5. Estadísticas de deserción por cohorte en los Programas de Ingeniería Uptc Sogamoso, [15].

En las Tablas 4, y 5, se observa la clasificación según algunas características socioeconómicas y de ingreso a la universidad para los programas de ingeniería de la sede. Donde se observa que los principales factores que están influyendo en la deserción y que deben ser considerados al momento de realizar un seguimiento con el fin de disminuir la deserción según los datos reportados en el SPADIES son:

En cuanto a la deserción por presentación de la prueba de estado, se encuentra que existe una mayor deserción cuando el estudiante trabajaba al momento de presentar la prueba, lo que implica una deserción no académica potencial a futuro, mientras que en cuanto al resultado de la prueba, se observa que entre mejor resultado es menor la deserción que se produce, lo que implica un potencial desertor si el resultado de la prueba es baja.

En cuanto a ingreso del núcleo familiar (Tabla 4), no se puede llegar a concluir por cuanto a diferencia de lo que sucede a nivel nacional, donde se observa que entre menor ingreso mayor deserción, en los programas de

ingeniería, no se puede concluir lo mismo, por cuanto la deserción es distribuida sin sesgo hacia uno de los dos lados excepto ingeniero industrial, donde la deserción es mayor si el ingreso del núcleo familiar es mayor, Analizando otra variable como lo es nivel educativo de la madre, sucede algo similar a lo presentado con los ingresos familiares, donde la distribución de deserción no puede ser concluyente al respecto.

Tabla 4. Deserción en decimo semestre considerando el Ingreso de la familia del estudiante

| Programa | Ingreso en Salarios Mínimos | Deserción |
|------------------------|-----------------------------|-----------|
| Ingeniería Geológica | [0,1) | 51.35% |
| | [1,2) | 47.62% |
| | [2,3) | 59.33% |
| | [3,5) | 50.00% |
| | [5,7) | 0.00% |
| Ingeniería de Minas | [0,1) | 39.87% |
| | [1,2) | 50.29% |
| | [2,3) | 41.44% |
| | [3,5) | 43.84% |
| | [5,7) | 37.50% |
| Ingeniería Electrónica | [7,10) | 45.45% |
| | [0,1) | 59.26% |
| | [1,2) | 54.61% |
| | [2,3) | 52.69% |
| | [3,5) | 62.71% |
| Ingeniería Industrial | [5,7) | 57.89% |
| | [0,1) | 29.60% |
| | [1,2) | 33.04% |
| | [2,3) | 34.91% |
| | [3,5) | 42.17% |
| | [5,7) | 55.56% |

[15]

CONCLUSIONES

De esta revisión se puede concluir que aunque la Uptc Sogamoso tiene estrategias implementadas para disminuir la deserción, lo que se ve representado en la disminución de la deserción por cohorte, se debe intensificar el esfuerzo en realizar un seguimiento a los estudiantes desde cuando ingresan y de esta forma disminuir la de-

serción en los diferentes programas, así como identificar las variables preponderantes en la deserción.

Se sugiere implementar una entrevista personalizada, con el fin de identificar desde el inicio que estudiantes tienen problemas económicos con el fin de disminuir la deserción no académica basada en los ingresos de la familia y reforzar el plan padrino para los estudiantes que ingresan a primeros semestres.

Tabla 5. Deserción en decimo semestre considerando el Examen de Estado

| Programa | Trabajaba al presentar | Deserción |
|------------------------|------------------------|-----------|
| Ingeniería de Minas | No | 44.56% |
| | Si | 65.12% |
| Ingeniería Electrónica | No | 53.02% |
| | Si | 60.00% |
| Ingeniería Geológica | No | 48.93% |
| | Si | 70.21% |
| Ingeniería Industrial | No | 34.84% |
| | Si | 40.54% |

| Programa | Clasificación | Deserción |
|------------------------|---------------|-----------|
| Ingeniería de Minas | Alto | 35.46% |
| | Medio | 47.97% |
| | Bajo | 62.60% |
| Ingeniería Electrónica | Alto | 47.42% |
| | Medio | 60.60% |
| | Bajo | 69.74% |
| Ingeniería Geológica | Alto | 42.34% |
| | Medio | 48.69% |
| | Bajo | 65.38% |
| Ingeniería Industrial | Alto | 34.66% |
| | Medio | 31.69% |
| | Bajo | 52.08% |

[15]

REFERENCIAS

[1] Ministerio de Educación Nacional de Colombia (2009), *Deserción estudiantil en la educación superior Colombiana Metodología de seguimiento, diagnóstico y elementos para su prevención.*

[2] Barragán-Díaz, D. Patiño-Garzón, L (2013) *Elementos para la comprensión del fenómeno de la de-*

serción universitaria en Colombia. Más allá de las mediciones. Cuadernos Latinoamericanos de Administración Vol IX Número 16. Págs. 55-66. DOI: <http://dx.doi.org/10.18270/cuaderlam.v9i16.1248>

[3] Suárez-Montes, N. & Díaz-Subieta, L. (2015). Estrés académico, deserción y estrategias de retención de estudiantes en la educación superior. *Revista de Salud Pública*, Vol 17 Numero 2, 300-313. DOI: <https://dx.doi.org/10.15446/rsap.v17n2.52891>

[4] Vásquez-Velásquez, J. Castaño-Vélez, E. gGallón-Gómez, S. y Gómez-Portilla, K. (2003) Determinantes de la desercion estudiantil en la Universidad de Antioquia. Informe Final de Investigación Centro de Investigaciones Económicas –CIE– de la Universidad de Antioquia.

[5] Londoño Ardila, L. (2013) Factores de riesgo presentes en la deserción estudiantil en la Corporación Universitaria Lasallista, *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, No 38. pp 183 – 194.

[6] Patiño-Garzón, L. y Cardona-Pérez, A. (2012) Revisión de algunos estudios sobre la deserción estudiantil universitaria en Colombia y latinoamérica. *Theoria*, Vol. 21 (1). Pp 9-20.

[7] González Pineda, C. Beltran Ortega, H. (2015) Deserción estudiantil en la universidad pública Colombiana: programa de economía de la Universidad de Cartagena. Trabajo de grado para optar por el título de Economista, Universidad de Cartagena

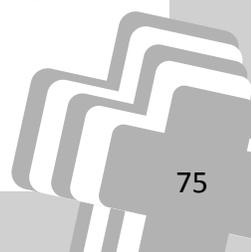
[8] Guzman Puentes, S. (2009) Deserción y Retención Estudiantil en los Programas de pregrado de la Pontificia Universidad Javeriana. Informe final de Investigación para optar el Título de Magister en Educacion.

[9] Chinome-Becerra, P. Ruiz-Cardenas, C. Fernandez-Samacá, L. (2016) Priorización de variables en el diseño de un sistema de gestión integral de la deserción estudiantil *Revista Educación en Ingeniería*. Vol. 11, Num. 22 pp 69 77.

[10] OECD Publishing, (2016) *Reviews of National Policies for Education Education in Colombia*, <https://books.google.com.co/books?id=oB8EDAAAQBAJ>

[11] Castaño, E., Gallón, S., Gomez, K. y Vasquez, J., (2008) Análisis de los factores asociados a la deserción estudiantil en la educación superior: un estudio de caso, *Revista de Educación*, Vol 1 No 345, pp 255-280.

[12] Ministerio de Educacion Nacional de Colombia (2014). “Tasa de desercion acumulada por cohorte según semestre, SPADIES”. Informe MEN Disponible en: <http://www.mineducacion.gov.co/>



sistemasdeinformacion/1735/articles-254702_archivo_pdf_estadisticas_2013.pdf

- [13] Ministerio de Educación Nacional de Colombia (2010). “Boletín de Educación superior No 14”. Disponible en http://www.mineduccion.gov.co/1759/articles-92779_archivo_pdf_Boletin14.pdf
- [14] Ministerio de Educación Nacional de Colombia (2009). Deserción Estudiantil en la Educación superior *Colombiana*. Disponible en http://www.mineduccion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/articles-254702_diagnostico_desercion.pdf
- [15] Ministerio de Educación Nacional, (2016) SPADIES, Disponible en <http://spadies.mineduccion.gov.co/spadies/JSON.html> Consultado Nov 15 de 2016

CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA SECCIONAL SOGAMOSO

La Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo I2+D, es una publicación que se edita semestralmente y maneja una convocatoria permanente, financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso -Boyacá, Colombia, creada en el año 2005. Tiene como misión publicar y divulgar artículos científicos, productos de una investigación, en todos los campos de la ingeniería y tecnología: Industrial, electrónica y comunicaciones, ciencias de la tierra, sistemas y computación, ingeniería de los materiales, ingeniería electromecánica, Ambiental, transporte y vías, y otras afines.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados en temáticas relacionadas con las diferentes áreas de la Ingeniería, para que presenten sus contribuciones y trabajos inéditos, en español o inglés. Podrán publicarse artículos originales, de investigación y/o innovación tecnológica.

Los artículos sometidos serán evaluados previamente por el comité editorial, y por pares evaluadores externos o internos antes de su publicación, que se reservan el derecho de decidir sobre su publicación. Los pares revisores emitirán un concepto sobre el contenido del artículo desde la calidad y el rigor científico, en el formato de evaluación establecido por la revista. Las observaciones y sugerencias manifestadas por los evaluadores serán enviadas a los autores para que realicen los respectivos ajustes, con el fin de decidir si el artículo cumple con las condiciones para ser publicable o no. La Revista siempre utilizará el sistema de “par doble ciego” En este proceso se da un espacio de correspondencia entre el editor y los autores para los ajustes necesarios. Los tiempos de publicación de un artículo dependerán en gran medida de la oportuna respuesta que los autores den a cada requerimiento del editor, los trabajos enviados a “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” no podrán ser sometidos simultáneamente a evaluación por otro medio de publicación. La aceptación de un artículo por parte del comité editorial, no implica que vaya a ser publicado, el contenido de los trabajos es responsabilidad exclusiva de sus autores. No se devolverán los originales de los trabajos.

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web www.uptc.edu.co/enlaces/ringinedesa, junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

Extensión del artículo:

Los artículos se presentan en hojas tamaño carta con márgenes superior: 3 cm, derecho: 2 cm, izquierdo: 3 cm e inferior: 2 cm, a espacio sencillo, doble columna, letra calibri y un contenido de máximo 10 páginas.

Estructura:

Secciones: título, resumen, palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimiento (si procede) y referencias. Para las tres primeras secciones se requiere, además, su traducción al inglés (title, abstract y keywords), que se colocará inmediatamente debajo de la versión en español.

Título: se sugiere no exceder de 15 palabras.

Resumen: máximo 250 palabras, el propósito del trabajo, los métodos empleados, resultados más significativos y conclusiones más importantes. Se redactará en un solo párrafo, en tiempo presente y modo impersonal. No incluirá abreviaturas, siglas, citas bibliográficas ni referencias a tablas o figuras.

Palabras clave: en orden alfabético, 4 o 5 términos relacionados con el contenido del artículo.

Introducción: tratará el tema específico del trabajo e informará sobre el propósito, importancia, aplicación práctica de la investigación y conocimiento actual del tema.

Materiales y métodos: proveerá suficiente información para que el experimento pueda repetirse bajo las mismas condiciones. Cuando los métodos, técnicas y procedimientos empleados sean muy conocidos, bastará con mencionarlos. Si se modifica un método de otro investigador deberá aportarse la cita y explicar detalladamente la modificación; pero si el método es nuevo, se describirá en detalle. Cuando se trate de investigaciones de campo, deberán aparecer las características del área de estudio y del muestreo.

Resultados: se expondrán mediante texto, figuras, tablas, cuidando no repetir una misma información en más de una forma, en esta sección se deben presentar los resultados hallados en la investigación.

Discusión: se explicarán los datos experimentales y se compararán con los resultados obtenidos por otros investigadores.

Las secciones de Resultados y Discusión podrán presentarse de forma independiente o combinada, según preferencia del autor.

Agradecimientos: será el lugar para reconocer la ayuda de personas e instituciones que aportaron significativamente al desarrollo de la investigación.

Referencias: Las referencias bibliográficas y citas, deben atender al estilo IEEE, se registrarán solamente los trabajos citados en el texto, que deberán tener un nivel adecuado de actualización, las referencias deben hacerse por orden de aparición en el artículo. Téngase en cuenta que la actualidad de las referencias es un elemento de gran peso en la evaluación de la calidad de los artículos, se debe adicionar el DOI a las referencias bibliográficas que lo tengan.

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: revistaid@uptc.edu.co o al enlace: www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa, a la sección Acerca de.

INDICE DE AUTORES

Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015) - Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017)

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo I²+D.

A

ABRIL GONZÁLEZ, NEBARDO ARTURO

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14

AMAYA REYES, EDWIN GILBERTO

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14

ANGARITA CEDIEL, FRANCISCO

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

ANGARITA MALAVER, EDISON FERNEY

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.
Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26

ARGUMEDO, CARLOS DORIA

Caracterización química de material particulado Pm10 en la atmosfera de Rioacha- La Guajira Colombia. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 5-16

ARIAS HERNÁNDEZ, JESÚS DANIEL

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

ARRIETA FUENTES, ÁLVARO JAVIER

Dispersión de material particulado (PM10), con Interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 39-50

B

BARRIOS URUEÑA, EDGAR

Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor. Vol. 1 N° (Enero-Junio 2017); pp. 17-25.

BECERRA, YEIMY LISETH

Propuesta metodológica para la definición de estrategias de mejoramiento en logística de pymes. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 48-57.

C

CALDERÓN MORENO, ROGER

Mapeo de objetos a través de un motor de datos NOSQL, caso de estudio: framework para desarrollo de aplicaciones web. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 63-73.

CÁRDENAS, MARISOL VALENCIA

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

CÁRDENAS AGUIRRE, DIANA MARÍA

¿Qué ha pasado con la aplicación del estudio de tiempos y movimientos en las últimas dos décadas?: revisión de la literatura. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 12-27.

CÁRDENAS, LEYDI JULIETA

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

CARREÑO SAYAGO, URIEL FERNANDO

Tratamientos de aguas industriales con metales pesados a través de zeolitas y sistemas de biorremediación . Revisión del estado de la cuestión. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 70-78.

CARVAJAL FERNÁNDEZ, LINA CONSUELO

Estandarización del proceso de fundición para arenas con resinas autofraguantes en la industria militar fábrica Santa Bárbara. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 13-19.

CORMANE TAMAYO, FERNANDO MIGUEL

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14.

CORREA MORALES, JUAN CARLOS

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

CORREDOR LÓPEZ, LUISA FERNANDA

Análisis del comportamiento del impuesto a las ventas con la implementación del impuesto nacional al consumo. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 7-12.

CRUZ MEDINA, FANNY LILIANA

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

CUEVAS CARRERO, WILLIAM ALEXANDER

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.
Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26

D

DÍAZ SERNA, FRANCISCO JAVIER

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

DÍAZ LAGOS, MERCEDES

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.80-89.

Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 62-73.

DUARTE PINILLA, NATALIA ANDREA

Justificación de una propuesta regulatoria para radiodifusión sonora y transmóviles en las fronteras colombianas. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 31-41.

E

ESPITIA FLÓREZ, HELBERTH YESID

Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 27-39.

F

FAGUNDO CASTILLO, JUAN REYNERIO

Caracterización química de material particulado Pm10 en la atmosfera de Rioacha- La Guajira Colombia. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 5-16

FONSECA PERALTA, HÉCTOR ANTONIO

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14.

FUENTES MOJICA, JUAN DAVID

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

G

GALVIS BOTÍA, DIANA ROCÍO

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

GÓMEZ NEITA, JUAN SEBASTIÁN

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

GÓMEZ ORTIZ, HÉCTOR IVÁN

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

GONZÁLEZ, EDGAR E.

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 62-73.

GRANDAS RINCÓN, ISNARDO ANTONIO

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

H

HACAR, FERNANDO

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69

HIGUERA MARTÍNEZ, OSCAR IVÁN

Controlador robusto LMI para un helicóptero de dos grados de libertad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 47-57.

Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 2-38.

Deserción estudiantil en Colombia y los programas de ingeniería de la Uptc seccional Sogamoso. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 70-76.

J

JEREZ JAIMES, JAVIER HERNANDO

Nuevo registro de Pseudocidaris spp. (Echinoidea: Hemicidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30

JIMÉNEZ LÓPEZ, ANDRÉS FERNANDO

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

JOJOA MUÑOZ, JAIME WILLIAM

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

JÖNSSON, JIMMY

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69.

L

LARA GONZÁLEZ, LUIS ÁNGEL

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

LASCARRO NAVARRO, FRANK DAVID

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14

LÓPEZ CARRASQUILLA, MAYRA DAYANA

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

LÓPEZ SÁNCHEZ, WILSON RICARDO

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero - Junio 2016); pp. 55-62.

LÓPEZ DÍAZ, ANDREA DEL PILAR

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

M

MANOSALVA SÁNCHEZ, SANDRA ROCIO

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.28-38.

MARTÍNEZ FLÓREZ, GUILLERMO

Comparación de estimadores no paramétricos frente a los paramétricos para la función de confiabilidad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 15-24

MARTÍNEZ BAQUERO, JAVIER EDUARDO

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

MARTINEZ HIGUERA, OSCAR IVÁN

Deserción estudiantil en Colombia y los programas de ingeniería de la UPTC seccional Sogamoso. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 69-75.

MARTÍNEZ OVALLE, SEGUNDO AGUSTÍN

Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.80-89.

MÉNDEZ MEDINA, DIEGO F.

Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 2 (Enero-Junio 2016); pp. 27-39.

MORENO RUBIO, JORGE JULIÁN

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.
Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

MORALES SUAREZ, LUIS E.

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

MORENO TÉLLEZ, CARLOS MAURICIO

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.51-61.

N

NARANJO MERCHÁN, WILSON ENARIO

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

NEIRA TRIANA, CARLOS ANDRÉS

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

Ñ

ÑUSTES, WISTON

Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 37-48.

O

OCAMPO VELEZ, PABLO CESAR

Cadena de abastecimiento verde en empresa textil colombiana. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 85-92.

OSMA DUARTE, ALVARO SERGIO

Nuevo registro de *Pseudocidaris* spp. (Echinoidea: Hemicidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30

OVALLE CASTIBLANCO, ALEX MAURICIO

¿Qué ha pasado con la aplicación del estudio de tiempos y movimientos en las últimas dos décadas?: revisión de la literatura. Vol.16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 12-27.

P

PARRADO S., ELÍAS

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

PAREDES ROA, RICARDO ALFONSO

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

PATIÑO DUQUE, HERNÁN DARÍO

Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 49-58.

PAZ PENAGOS, HERNÁN

Justificación de una propuesta regulatoria para radiodifusión sonora y transmóviles en las fronteras colombianas. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 31-41.

PEÑARANDA, NYDIA GENITH

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

PINTO SALAMANCA, MARÍA LUISA

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

PORRAS CASTRO, HERNÁN OSWALDO

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

PRADA OSPINA, RICARDO PABLO

Cadena de abastecimiento verde en empresa textil colombiana. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 85-92.

PUNTES PÉREZ, JOAN SEBASTIÁN

Nuevo registro de Pseudocidaris spp. (Echinoidea: Hemicidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoaca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30.

PUERTO LEGUIZAMÓN, GUSTAVO

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 55-62.

Q

QUINTERO GONZÁLEZ, JULIÁN RODRIGO

Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 39-45.

QUINTERO GONZÁLEZ, LAURA ESTEFANÍA

Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 39-45.

R

RAMÍREZ MONTOYA, JAVIER

Comparación de estimadores no paramétricos frente a los paramétricos para la función de confiabilidad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 15-24

RESTREPO BURGOS, NORMA

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

REYES, YULIETH C.

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 62-73.

RICARDO BARRERA, JAIME FREDDY

Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor. Vol. 1 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 17-25.

RIVERA, SERGIO

Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 37-48.

ROA BOHÓRQUEZ, KAROL LIZETH

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Soga-moso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

RODRÍGUEZ, JULIÁN LEONARDO

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

ROJAS MARTÍNEZ, ELÍAS ERNESTO

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14

ROMERO MOLANO, CESAR AUGUSTO

Monitorización web de señales industriales usando sistemas embebidos. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 48-54.

ROSETO CORAL, BRAYAN DARÍO

Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 49-58.

RUGE GUERRERO, OSCAR ORLANDO

Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 80-89.

RUÍZ CÁRDENAS, CONSUELO

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

S

SALAMANCA, JUAN MAURICIO

Controlador robusto LMI para un helicóptero de dos grados de libertad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 47-57.
Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26

SELEEY, DANIEL ARENAS

Mapeo de objetos a través de un motor de datos NOSQL, caso de estudio: framework para desarrollo de aplicaciones web. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 63-73.

SUÁREZ DÍAZ, LAURA MELISA

Estandarización del proceso de fundición para arenas con resinas autofraguantes en la industria militar fábrica Santa Bárbara. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 13-19.

SUÁREZ FAJARDO, CARLOS ARTURO

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero - Junio 2016); pp. 55-62.

T

TINJACÁ SOLER, JONATHAN JAVIER

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.

TORRES BARAHONA, EDGAR ABSALÓN

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.51-61.

TORRES, OMAR E.

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.62-73.

V

VERGARA, INÉS

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.62-73.

VIGNE, GABRIELE

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69.



REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA SECCIONAL SOGAMOSO

SUSCRIPCIÓN / SUBSCRIPTIONS

Nombre/Name: _____ C.C. _____

Apellidos/Last Name: _____

Profesión/Profession: _____

Departamento académico/Academic department: _____

Dirección de Envío/Address: _____

Teléfono/Telephone Number : _____ ext _____ Fax: _____

Oficina/: _____

Ciudad/City: _____

País/Country: _____

Correo Electrónico/Email: _____

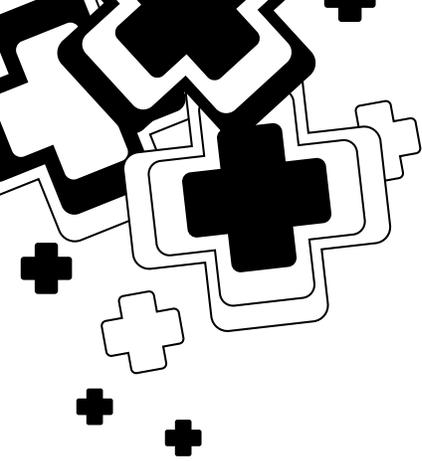
Suscripción a partir del número/ Subscription from number : _____

Firma: _____

Envíe este formato totalmente diligenciado a: revistaiid@uptc.edu.co; a vuelta de correo recibirá el ejemplar solicitado de la revista I²+D. La suscripción a la Revista I²+D es totalmente gratuita.

Correspondencia, Canje y Suscripciones

REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I²+D
Calle 4 Sur N° 15-134 Tels.: (57+8) 7705450, 770 6896, 770 7721 Ext. 2606
Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia
E-mail: revistaiid@uptc.edu.co
www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa
DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>



**ESCUELA DE FORMACIÓN POSGRADUADA
SECCIONAL SOGAMOSO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ÉNFASIS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
SNIES 102444**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
SNIES 104702**

**MAESTRÍA EN SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO
ÉNFASIS EN HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL
SNIES 105095**

**MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN
ÉNFASIS EN INNOVACIÓN
ÉNFASIS EN GERENCIA DE PROYECTOS
SNIES 105707**

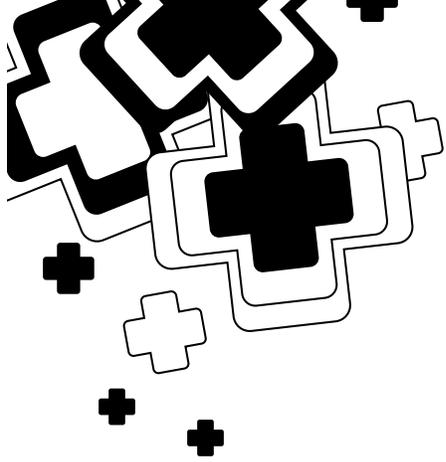


Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
DE ALTA CALIDAD
MULTICAMPUS
RESOLUCIÓN 3910 DE 2015 MEN / 6 AÑOS

POR LA ACADEMIA, LA CALIDAD
Y LA RESPONSABILIDAD SOCIAL
UNIVERSITARIA

Contacto
Facultad Seccional Sogamoso
Escuela de Formación Posgraduada
Calle 4 Sur No. 15-134 - Sogamoso, Boyacá
PBX: 7 40 56 26 Ext.:2614-2615 Fax: 7707547
posgrados.sogamoso@uptc.edu.co



**ESCUELA DE FORMACIÓN POSGRADUADA
SECCIONAL SOGAMOSO**

**ESPECIALIZACIÓN EN SEGURIDAD
Y SALUD EN EL TRABAJO
SNIES 105650**

**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DEL TALENTO HUMANO
SNIES 7135**

**ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN Y AUDITORÍA TRIBUTARIA
SNIES 104414**

**ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL
SNIES 6572**

**ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
Y OPERACIONES
SNIES 54914**

**ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
SNIES 4453**

**ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES
SNIES 104190**

**ESPECIALIZACIÓN EN GEOTECNIA VIAL
SNIES 9235**

**ESPECIALIZACIÓN EN ECONOMÍA MINERA
SNIES 105129**



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
DE ALTA CALIDAD
MULTICAMPUS
RESOLUCIÓN 3910 DE 2015 MEN / 6 AÑOS

POR LA ACADEMIA, LA CALIDAD
Y LA RESPONSABILIDAD SOCIAL
UNIVERSITARIA

Contacto

Facultad Seccional Sogamoso
Escuela de Formación Posgraduada
Calle 4 Sur No. 15-134 - Sogamoso, Boyacá
PBX: 7 40 56 26 Ext.:2614-2615 Fax: 7707547
posgrados.sogamoso@uptc.edu.co