

# E L E M E N T O S

VOLUMEN 6. NÚMERO 1. JUNIO DE 2016. ISSN: 2027-923X

ELEMENTOS recibirá artículos escritos principalmente por docentes, investigadores, empresarios, investigadores externos (nacionales y extranjeros) y semilleros de investigación, quienes aportarán a los campos de conocimiento de la Ingeniería y Ciencias Básicas.

## REVISTA ELEMENTOS

**Elementos**  
ISSN 2027-923X  
Revista Académica

**Volumen 6. Número 1**  
Junio de 2016

**Incluida en:**

Chemical Abstracts Service (CAS)

PUBLINDEX: Índice Bibliográfico Nacional del Sistema Nacional de Indexación de Publicaciones Científicas Colombianas. (Categoría C).

LATINDEX: Sistema de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. UNAM (México).

ULRICH WEB Global Serials Directory.

SHERPA/ROMEO University of Nottingham.

EBSCO: Academic Source.

DIALNET: Portal de Difusión de la Producción Científica Hispana. Universidad de La Rioja.

Centro de Información Tecnológica (CIT). Chile. e-Libro / e-brary.

---

**Institución Universitaria Politécnico Gran-colombiano.**

**Presidente**  
Fernando Dávila Ladrón de Guevara

**Rector**  
Jurgen Chiari Escobar

**Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas**  
Rafael Armando García Gómez

---

**Director Revista Elementos**  
Rafael Armando García Gómez

**Editor científico**  
César Augusto Quiñones Segura

**Editor asociado**  
Jaime Andrés Posada Restrepo

---

**Editorial Politécnico Grancolombiano**

**Editor**  
Eduardo Norman Acevedo

**Coordinador de producción**  
David Ricciulli Duarte

**Diseño y armada electrónica**  
Jaime Andrés Posada Restrepo

**Corrección de estilo**  
Nydia Patricia Gutiérrez Domínguez  
npg.comunicaciones@gmail.com

**Ilustraciones y carátula**  
Santiago Arciniegas

**Impresión**  
Xpress estudio gráfico y digital

---

**Comité Científico y Editorial**

Mauricio Ayala  
*Universidade de Brasília. Brasil*  
ayala@unb.br

Gabriela Barrantes  
*Universidad de Costa Rica. Costa Rica*  
gabriela.barrantes@ecci.ucr.ac.cr

Walter Bender  
*Sugarlabs. Estados Unidos*  
walter@sugarlabs.org

Luis Cáceres  
*Universidad Tarapacá de Arica. Chile*  
lcaceres@uta.cl

Jonice de Oliveira Sampaio  
*Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil*  
jonice@dcc.ufrj.br

Fabio González  
*Universidad Nacional de Colombia. Colombia*  
fgonzalezo@unal.edu.co

Alexis Irlande  
*Université Blaise Pascal. Francia*  
airlande@unal.edu.co

Hermann Mena  
*University of Innsbruck. Austria*  
Hermann.Mena@uibk.ac.at

César Muñoz  
*National Aeronautics and Space Administration, NASA. Estados Unidos*  
cesar.a.munoz@nasa.gov

Carlos Paternina  
*Fundación Universidad del Norte. Colombia*  
cpaterni@uninorte.edu.co

César Quiñones  
*Politécnico Grancolombiano. Colombia*  
caquinones@poli.edu.co

Jairo Rocha  
*Universitat de les Illes Balears. España*  
jairo@uib.es

Las opiniones expresadas en cada uno de los artículos son de exclusiva responsabilidad de los autores.  
Versión electrónica: [www.poligran.edu.co/elementos](http://www.poligran.edu.co/elementos)



Elementos por Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución – NoComercial – SinDerivadas 3.0 Unported.

## Índice general

<b>Editorial</b> .....	5
Análisis en estado estable y transitorio de fuentes de generación distribuida operando en isla .....	9
<i>Henry Giovanni Pinilla Rodríguez, Andrés Julián Aristizábal Cardona</i>	
Centrales fotovoltaicas: contexto colombiano frente a latinoamérica continental de habla hispana .....	31
<i>Diego Fernando Chacón Serna, Cristhian Mauricio Moreno Amaya, Johann Alexander Hernández Mora</i>	
A note on the Fourier transform in Hölder-spaces .....	61
<i>Duván Cardona Sánchez</i>	
Modelado de sensores basado en la Arquitectura MDA para microrredes eléctricas .....	69
<i>Elvis Eduardo Gaona García, Cesar Leonardo Trujillo Rodríguez, Víctor Daniel Angulo Morales</i>	
Toxicidad aguda de una formulación comercial de glifosato sobre <i>poecilla reticulata</i> (pisces: poecilidae) en condiciones de laboratorio .....	91
<i>Francois Herrera Jacquelin, Karenn Eliana Beltran González, Jennifer Andrea Garzón González, Laura González Sánchez, Laura Milena Herrera Rivera, Andrés Felipe Torres Cequera</i>	
Determinación de la longitud de onda máxima por barrido espectral dentro del rango ultravioleta visible (UV-VIS) .....	101
<i>Gema Eunice Acosta Niño, Alejandro Bourdon, Dennis Isabel Guitierrez</i>	
Evaluación del potencial de generación fotovoltaica en la ciudad de Quibdó, Chocó .....	109
<i>Héctor David Agudelo Arias, Lubin Delgado Arroyo, Andrés Julián Aristizabal Cardona</i>	

Coefficiente de actividad de $C_{16}E_{20}$ en solución acuosa a 25 °C a partir de Equilibrio Solución-Superficie (ESS) . . . . .	125
<i>Julio Alberto Clavijo Penagos, Jesús Gracia Fadrique</i>	
Propuesta de diseño de un simulador de un microscopio electrónico de barrido para el desarrollo de aprendizaje significativo en nanotecnología . . . . .	135
<i>July Alexandra Rincón Chacón, Juan Camilo Guzman Monroy, Herbert Edén Díaz Rodríguez, Camilo Andrés Páez Gallo, Brayan Sneider Garzon, Jose Fernando Arias Mendoza, Juan Daniel Contreras Soto</i>	
Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas . . . . .	149
<i>Natalia Martínez Rojas, Hugo Hernando Andrade Sosa</i>	

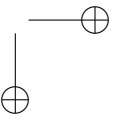
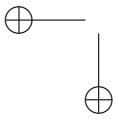
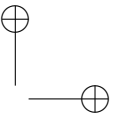
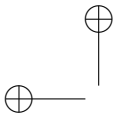


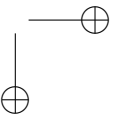
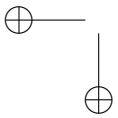
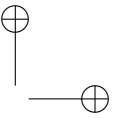
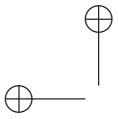
## Editorial

Unas palabra cálidas...

Junio de 2016

César Augusto Quiñones Segura  
*Editor científico, Revista Elementos*  
Politécnico Grancolombiano  
[caquinones@poligran.edu.co](mailto:caquinones@poligran.edu.co)









## Análisis en estado estable y transitorio de fuentes de generación distribuida operando en isla

### Analysis of Distributed Generation Sources in Dynamic and Stable States in Island Mode Operation

Henry Giovanni Pinilla Rodríguez<sup>1\*</sup>, Andrés Julián Aristizábal Cardona<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad Central. Bogotá, Colombia

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia

FECHA DE ENTREGA: 13 DE ENERO DE 2016  
FECHA DE EVALUACIÓN: 29 DE MARZO DE 2016  
FECHA DE APROBACIÓN: 19 DE ABRIL DE 2016

**Resumen** En éste trabajo se presenta un esquema de operación para que una planta de generación distribuida de potencia opere de manera aislada en un sistema de distribución. Se analiza su funcionamiento mediante simulaciones de estado estable y dinámico.

Los análisis fueron realizados sobre un sistema de prueba radial IEEE de 13 nodos, gracias a que este tipo sistemas cuenta con diversas configuraciones de fase para las líneas, cargas desbalanceadas, bancos de condensadores y transformadores de media a baja tensión. En cuanto a las tecnologías simuladas, se hizo uso de dos tipos de generación distribuida: generadores síncronos y generadores asíncronos con el fin de incluir energías renovables y no renovables, y por otro lado máquinas síncronas y asíncronas. Los resultados indican un aumento en los perfiles del voltaje de los nodos más críticos del sistema: 1,5% dependiendo del tipo de tecnología utilizada

\* Maestría en Ingeniería – Gestión Sostenible de la Energía, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2015. Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, 2004. Docente de Tiempo Completo – Universidad Central, 2008 – Actual. Áreas de interés: Generación Distribuida, Potencia Eléctrica, Máquinas Eléctricas. [hgpinillar@ucentral.edu.co](mailto:hgpinillar@ucentral.edu.co)

\*\* Posdoctorado Proyecto Distribución Eléctrica Inteligente SILICE, Universidad Nacional de Colombia, 2010. Doctorado en Ciencias – Física, Universidad Nacional de Colombia, 2008. Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, 2004. Director Maestría en Ingeniería – Gestión Sostenible de la Energía, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2014 – Actual. Áreas de Interés: Energía Solar, Instrumentación Electrónica y Sensores, Calidad de Energía, Generación Distribuida. [andresj.aristizabal@utadeo.edu.co](mailto:andresj.aristizabal@utadeo.edu.co)

(máquina síncrona o asíncrona) y 2% dependiendo del punto de ubicación en la red radial. Durante el control de operación de la máquina PQ, el nivel de cargabilidad “ $\lambda$ ” en el nodo 646 del sistema, comparado con la máquina síncrona; aumenta en 0,545 MW, para un nivel de colapso de voltaje de 78,42 V. Las simulaciones muestran que la utilización de fuentes de generación distribuida aumenta la frecuencia de oscilación del sistema de 13 nodos y estas oscilaciones de frecuencia son más grandes cuando se usan máquinas asíncronas del orden de 5,09 Hz.

**Abstract** This paper presents an outline for a power distributed generation plant to operate in isolation within a distribution system. We analyze its performance through stable and dynamic simulations.

The analyses were carried out on an IEEE radial test of 13 nodes because this type of system has several phase configurations for lines, unbalanced loads, and condenser and transformer banks. Regarding the simulated technologies, we used two types of distributed generation: Synchronous and asynchronous generators in order to include renewable and non-renewable energy and synchronous and asynchronous machines. The results indicate an increase in the voltage profile of the most critical nodes: 1.5% depending on the type of technology used (synchronous or asynchronous machine) and 2%, depending on the location point within the radial network.

During the operation control of the PQ machine, the “ $\lambda$ ” load level within the node 646 —compared to the synchronous machine— increased 0.545 MW, for a voltage collapse level of 78.42 V. The simulations show that the use of distributed generation sources increases the oscillation frequency of the 13-node system and these frequency oscillations are bigger when 5.09 Hz asynchronous machines are used.

**Palabras Clave:** generación distribuida, operación en isla, sistema de distribución radial

**Keywords:** distributed generation, island mode operation, radial distribution system

## 1. Introducción

En la actualidad, el desarrollo de fuentes alternas y renovables es una prioridad para algunos países, debido a la crisis energética que se está presentando. Esta situación energética es causada por el aumento de la demanda (cada vez es más difícil llevar energía desde grandes centros de generación hasta centros de consumo), dependencia de los combustibles fósiles (calentamiento global) y desregulación de la industria. La Generación Distribuida (GD) representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque se pudiera pensar que es un concepto nuevo, la realidad es que tiene su origen, de alguna forma, en los inicios mismos de la generación eléctrica.

La principal idea de la generación distribuida es que a pequeña escala puede ser fácilmente ubicada cerca del punto de consumo. Los generadores distribuidos y dispersos, son por definición, generadores de pequeño tamaño; lo cual puede provenir de lo tradicional o de nuevas tecnologías revolucionarias [1].

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

El nivel de voltaje de la generación distribuida puede variar dependiendo del país, ya que la GD se asocia con la inyección de potencia en las redes de distribución. En el caso de Colombia, la GD estaría en los niveles 1, 2 y 3 definidos por la CREG (menor a 57.5 kV). La distribución puede cubrir todas las redes de nivel inferior a 220 kV. La generación distribuida incluye la aplicación de pequeños generadores, típicamente en el rango de 15 kW a 10 MW en capacidad [2].

La interconexión de nuevas fuentes de energía al sistema eléctrico tradicional trae una serie de ventajas técnicas y económicas. Dentro de estas ventajas encontramos reducción de pérdidas, oferta en picos, mejoras en la calidad de la energía eléctrica (forma de onda de voltaje, frecuencia, estabilidad de la tensión, suministro de potencia reactiva y corrección del factor de potencia), fuentes de alta confiabilidad para sistemas no interrumpibles, reducción de emisiones atmosféricas, generación de respaldo al sistema en caso de emergencia y mayor eficiencia (en la cogeneración) [3], generación de energía limpia con fuentes renovables. A demás se evitan los altos costos al obviarse las pérdidas económicas en las que se incurre cuando hay fallas en la provisión de la energía a ciertos servicios especializados.

Por otro lado, aunque se presenten ventajas, también encontramos barreras en la utilización de generación distribuida en el ámbito técnico, legal y regulatorio. Entre los problemas, tanto en la operación en régimen permanente como transitorio, pueden citarse: mal funcionamiento del esquema de protecciones, posible operación en isla, anulación de las ventajas del uso de reconectores, generación de sobretensiones permanentes, excitación de ferresonancia, impacto en la calidad de potencia [4]. También se presentan limitaciones económicas (por los altos costos de inversión), desconocimiento del potencial de la GD y ausencia de estándares para conectar dichos proyectos a la red.

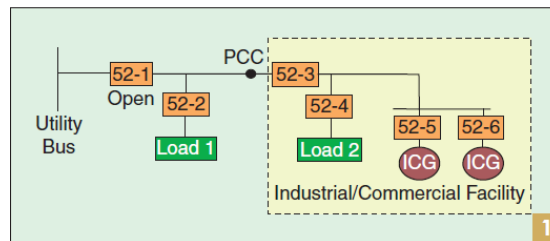
## 2. Operación en isla

El fenómeno de isla se presenta cuando existe pérdida de la fuente principal del sistema de distribución, que por lo general es causada por un disparo del interruptor del circuito necesario para aislar una falla en otra parte del sistema. Esto produce una isla independiente de energía y en función de las capacidades de la unidad de generación distribuida, se puede seguir alimentando la isla durante el tiempo que la frecuencia del sistema y la tensión se mantienen dentro de los límites de operación requerida. Sin embargo, la alimentación de la isla sin el suministro de red produce un riesgo de seguridad para el personal de servicios públicos y las personas, ya que parte del sistema se considera como desactivado. También presenta aspectos graves para la calidad de la energía del servicio eléctrico a los clientes de servicios públicos en la isla y complica la restauración ordenada de la oferta de servicios públicos [5].

La operación en isla puede ser intencional o involuntaria, estando normalmente prohibida la involuntaria, en cambio la intencional es solo permitida

por las empresas distribuidoras (ED) luego del cumplimiento de una serie de requerimientos.

En la figura 1, se muestra un ejemplo de funcionamiento en isla intencional o involuntaria. Si el interruptor 52-1 se abre o el bus de la red pierde voltaje por alguna razón, la condición en isla aparece [6]. Los generadores industriales/comerciales (ICG's) son conectados a la carga 2 (intencionado) o a la carga 1 (involuntario).



**Figura 1.** Aislamiento de un subsistema que contiene cargas industriales/comerciales y de servicios públicos.

La preocupación es que fuentes como los ICG's, que no están bajo el control del operador de la red, pueden generar que los voltajes y frecuencias de salida superen los límites especificados por la regulación estatal. Estos cambios, pueden generar daños en los equipos del cliente, es por esto que las protecciones deben estar en capacidad de detectar esta situación. Este problema se podría solucionar, teniendo en cuenta la figura 1, instalando un interruptor 52-3 en el punto PCC, con dispositivos de protección y control que detecten la condición en isla y abran, por lo que el IGC solo suple la carga 2.

La IEEE 1547 y otros estándares obligan a la utilización de controles y protecciones para detectar islas y minimizar la duración de las mismas. El ajuste de las protecciones para responder correctamente a la detección de islas cuando la presencia de GD es alta, puede afectar el comportamiento dinámico del sistema [7].

Para la operación en isla, se deben cumplir las siguientes condiciones, esto con el fin de mantener valores consistentes de tensión y frecuencia:

- Carga total menor o igual a la generación total (tanto para potencias activas como reactivas).
- Debe disponerse de un control estable de velocidad (frecuencia) ya sea por regulador automático o mediante interruptores rápidos (SSCB) que controlan cargas “colchón” (almacenan y retornan velozmente) o equipos almacenadores. Los dispositivos reguladores normales, diseñados para operación interconectada no son capaces de cumplir esta función.



ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

- El regulador del generador (AVR) debe suministrar voltaje adecuado, de manera que la tensión en todos los consumidores de la isla se encuentre dentro de límites especificados, considerando las caídas internas de la isla.
- El AVR debe tener respuesta adecuada frente a cargas de conexión brusca o de alta pendiente de aumento, evitando variaciones excesivas de tensión.
- Debe limitarse el tamaño máximo de las cargas individuales, particularmente motores que trabajan durante la isla, evitando así variaciones de tensión elevadas.
- Durante la operación en isla, deben establecerse límites más estrictos respecto a equipos con elevada inyección de armónicas y generadores de desbalance, ya que al tener menor potencia de cortocircuito, se debe ser menos tolerante por falta de capacidad de “absorción”.
- Debe disponerse de un sistema de desconexión de cargas (shedding), que se activa a medida que cae o sube la frecuencia.

### 3. Metodología para analizar el funcionamiento en isla

El análisis que aquí se presenta, tiene su fundamento en las simulaciones y resultados del informe de investigación “Distribución Eléctrica Inteligente – SILICE Fase II” [8].

#### 3.1. Modelamiento de las plantas de generación

Se realizarán pruebas con dos tipos de generación distribuida: maquinas sincrónicas y asíncronas. Esto con el fin de abordar tanto energías renovables como convencionales.

*Máquinas sincrónicas.* Se usaron unidades de rotor liso con una capacidad de 1.25 MVA. Estas unidades fueron caracterizadas usando el *software* NEPLAN [9]. Las impedancias de secuencia, transitoria y subtransitoria son necesarias para realizar simulaciones de cortocircuito. Los parámetros usados fueron tomados de [10] y se presentan en las figuras 2 y 3.

0.4-1.25MVA	$T'_{do} = 5,51s$	$D = 0$	$X''_d = 0,171$
	$T''_{do} = 0,10s$	$X_d = 2,062$	$X'_q = 0,171$
0.48kV	$T'_{qo} = 0,8s$	$X_q = 1,35$	$X_l = 0,1$
	$T''_{qo} = 0,1s$	$X'_d = 0,251$	$S(1,0) = 0,176$
	$H = 1,29s$	$X'_q = 0,631$	$S(1,2) = 0,49$

**Figura 2.** Parámetros de la generación distribuida sincrónica [10].

$T_R = 0,02s$	$V_{RMIN} = -7,3$	$T_F = 1,0$
$K_A = 400$	$K_E = 1$	$E_1 = 5,475$
$T_A = 0,02s$	$T_E = 0,253s$	$S_E(E_1) = 0,5$
$V_{RMAX} = 7,3$	$K_F = 0,03$	$E_2 = 7,3$
		$SE(E_1) = 0,86$

**Figura 3.** Parámetros de los excitadores para la generación distribuida sincrónica [10].

### 3.2. Modelamiento de la generación central

Como unidad de generación central se utilizan los valores presentados en la figura 4.

615MVA	$T'_{do} = 3,3s$	$D = 2$	$X''_d = 0,23$
	$T''_{do} = 0,02s$	$X_d = 0,898$	$X''_q = 0,2847$
	$T'_{qo} = 0,001s$	$X_q = 0,646$	$X_l = 0,2396$
15kV	$T''_{qo} = 0,06s$	$X'_d = 0,2995$	$S(1,0) = 0,18$
	$H = 5,145s$	$X'_q = 0,646$	$S(1,2) = 0,33$

**Figura 4.** Parámetros de la generación central [10].

### 3.3. Modelamiento de los sistemas de distribución

Las simulaciones fueron realizadas sobre un sistema de prueba radial de la IEEE de 13 nodos [11]. Este sistema se considera pequeño, pero sin embargo presenta características interesantes: cargas relativamente grandes para un voltaje nominal de 4.16kV, un regulador de voltaje que consta de tres unidades monofásicas conectadas en estrella, transformador en línea, cargas desbalanceadas y distribuidas.

Para el análisis de estado estable se consideraron dos tipos de estudios:

1. Flujo de carga: En lo correspondiente al flujo de carga, se tuvo en cuenta la cargabilidad de los elementos, el perfil de voltaje en los nodos del sistema y las pérdidas en los sistemas.
2. Cortocircuito: se analizaron fallas trifásicas en el punto de conexión de las plantas de generación distribuida y en los nodos adyacentes con o sin el generador, para determinar el impacto de la conexión en la capacidad y las corrientes de cortocircuito en el área afectada.



Configuración	R (ohm/milla)	X (ohm/milla)	B (μS/milla)	I <sub>r max</sub> (A)
601	0,3465	1,0179	6,2928	730
602	0,7526	1,1814	5,6990	340
603	1,3294	1,3471	4,7097	230
604	1,3228	1,3569	4,6658	230
605	1,3292	1,3475	4,5193	230
606 (sub)	0,7982	0,4463	96,8897	329
607 (sub)	1,3425	0,5154	88,9912	310

Figura 6. Configuración de líneas, Sistema de prueba radial IEEE de 13 nodos [12].

de excitación para estudios de estabilidad IEEE Std 421.5 tipo ST “Sistemas de Excitación Estático tipo 1” [13], mostrado en la figura 7; en el cual se encuentra actuando continuamente el regulador del sistema de excitación de la maquina sincrónica.

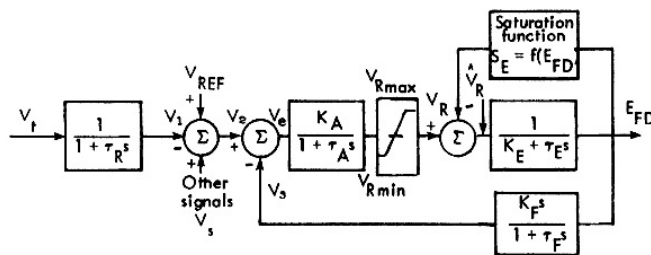


Figura 7. Sistema de excitación tipo 1 [14].

En el *software* Neplan, el bloque de control se modeló y se agregó al generador síncrono que simula la GD, tal como se indica en la figura 8 y las variables a configurar se muestran en la figura 9. La forma de ingresar los parámetros difiere del tipo de bloque y su función de transferencia se muestra en el manual y tutorial del programa Neplan.

Para la conexión de las máquinas generadoras a la red de distribución se utilizaron dos modelos de transformador: el primero para conectar la unidad de generación central, tipo reductor de 15/4,16 kV y el segundo para conectar los generadores síncronos a los nodos de la red, tipo elevador de 0,48/4,16 kV. Los parámetros se indican en la figura 10.

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

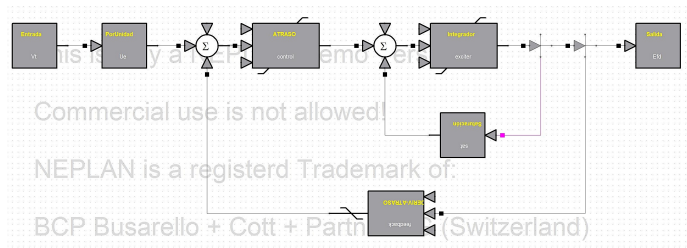


Figura 8. Bloque de control para el excitador tipo 1.

Simbolo	Descripción	Valor
TR	Constante de tiempo de entrada del regulador	0,02 s
KA	Ganancia del regulador	400
TA	Constante de tiempo del Amplificador del regulador	0,02 s
KE	Ganancia de la excitatriz	1
TE	Constante de tiempo de la excitatriz	0,253 s
KF	Ganancia del lazo de estabilización del voltaje de salida del amplificador	0,03
TF	Constante de tiempo del bloque de estabilización	1,0 s
VRMAX	Voltaje de salida máxima del regulador	7,3 V
VRMIN	Voltaje de salida mínimo del regulador	-7,3 V
E1	Voltaje de saturación	5,475 V
SE75max	Función de saturación del excitador al 75 %	0,5
E2	Voltaje de saturación	7,3 V
SEMAX	Función de saturación del excitador al 100 %	0,86

Figura 9. Configuración de excitador.

	S (KVA)	VH (kV)	VL (kV)	R %	X %
TR Gen-Sin	5000	15 - D	4,16 - Y	1	8
TR GD	400	0,48 - D	4,16 - Y	1,1	5
XFM-1	500	4,16 - Gr W	0,48 - Gr W	1,1	2

Figura 10. Configuración de transformadores.

#### 4. Resultados

Para la realización de las simulaciones se utilizó el modelos IEEE de 13 nodos desbalanceado que tiene cargas relativamente grandes y distribuidas por las líneas, bancos de condensadores y transformadores reductores de media a baja tensión. Para modelar y simular correctamente el sistema de prueba, se empleó un modelo balanceado y simétrico, con el cual se pueden hacer los análisis de estabilidad transitoria y de pequeña señal, análisis que no puede realizar el simulador para un sistema desbalanceado asimétrico.

Al sistema de prueba se les incluye un generador central síncrono con una constante de inercial de 5,145 s, con lo cual se prueba el comportamiento dinámico del la red. Las máquinas de generación distribuida “GD” síncronas y asíncronas, se agregan a los nodos de la red donde mas se presenta disminución en el perfil del voltaje, esto causado por la carga o porque son los puntos mas alejados en la red radial. Para observar el comportamiento del perfil de voltaje en los nodos del sistema se realiza un análisis de “estabilidad de voltaje” que nos muestre si los voltajes en todos los nodos están dentro de un rango aceptable.

Lo primero que se realizó fue un análisis de estado estable ejecutando un flujo de carga por el método de Newton Raphson para el modelo de 13 nodos. Con esto determinamos cuáles son los nodos de la red con la mayor caída en el perfil del voltaje como se puede ver en la figura 11. Estos son los nodos más críticos, razón por la cual fueron tomados como criterio fundamental para incluir las unidades de GD síncrona y asíncrona y realizar los análisis estáticos y dinámicos del comportamiento del sistema.

Dado que la versión 5.24 utilizada de Neplan no tiene reguladores de voltaje que ayuden a mantener el perfil del voltaje, se incrementó el voltaje de la unidad de generación central en un 110 % de manera que la caída de voltaje en los puntos más alejados y de mayor cargabilidad de la red, no sea tan alta y se mantenga dentro de los limites de operación del sistema 90 -110 %.

MS 13 N								
Nodo	U kV	U %	Nodo	U kV	U %	Nodo	U kV	U %
646	3,914	94,09	684	3,938	94,65	675	3,928	94,42
645	3,921	94,26	611	3,934	94,58	N-Gen-Sin	16,5	110
633	4,118	98,99	652	3,929	94,45	650	4,421	106,29
671	3,945	94,83	680	3,903	93,81	N 632-671	4,034	96,97
634	0,456	95,03	692	3,943	94,79	632	4,134	99,37

Figura 11. Resultados del flujo de carga del sistema IEEE 13 nodos.

#### 4.1. Casos de análisis en el sistema de 13 nodos

Para este sistema se definió como parámetro el flujo de carga de la “ figura 13” y los nodos de mayor carga y mas alejados de la unidad de generación central. Por lo tanto se introduce una unidad de GD en el nodo 646, 652 y 675 tal y como se muestra en la figura 12.

Primero se ejecuta el análisis de flujo de carga continuo para cada uno de los casos y luego se observa que ocurre con los perfiles de voltaje en todos los nodos comparados con el flujo de carga del sistema con la unidad de generación central mostrados en la figura 11.

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

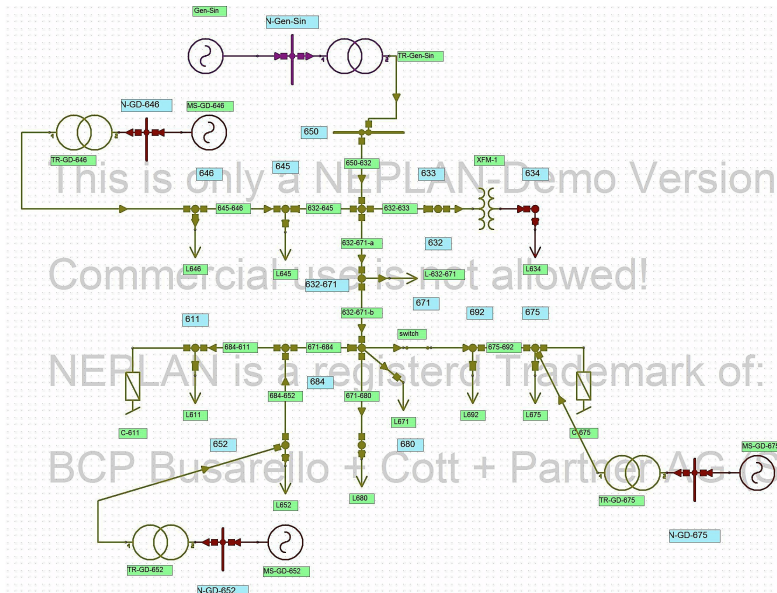


Figura 12. Sistema de prueba radial IEEE de 13 nodos.

Este análisis de flujo de carga se hace primero con las unidades de GD en el modo de operación PV, luego éstas mismas unidades en el modo de operación PQ y finalmente se agregan unidades de generación asincrónicas “MAS”. Los resultados se muestra en la figura 13.

Se puede observar como para cada caso, los perfiles de voltaje aumentan en los nodos mas críticos. Lo cual indica que se incrementa la estabilidad para la carga al instalar máquinas de generación cerca o donde se encuentren las cargas mas grandes. Los perfiles de voltaje en los nodos 680 y 646 aumentaron aproximadamente 3 % comparado con los resultados mostrados en la figura 11. También se observa cómo dependiendo del tipo de tecnología utilizada (máquinas síncronas “MS” y maquinas asíncronas “MAS”), el perfil de voltaje varia 1,5 % aproximadamente y dependiendo del punto de ubicación el la red radial; el perfil se incrementa en 2 % aproximadamente. Esto es muy positivo porque si se produce una perturbación en el sistema, éste es capaz de retornar en un tiempo aceptable a un estado de equilibrio (igual o distinto al anterior) donde los voltajes en todos los nodos estén dentro de un rango de operación.

Ahora analizamos el comportamiento de la estabilidad de voltaje corriendo simulaciones de flujo de carga continuo, primero con variación del control de operación de la unidad de GD en el modo PV o PQ y luego variando el comportamiento del factor de carga “FC” cuando se agrega una unidad de GD asíncrona.

GD 675				GD 652				GD 646			
Nodo	u% PV	u% PQ	MAS	Nodo	u% PV	u% PQ	MAS	Nodo	u% PV	u% PQ	MAS
633	100,4 2	100,3 7	94,7	633	100,3	100,3	99,56	633	99,84	99,84	97
645	95,76	95,71	94,87	645	95,64	95,64	94,85	645	98,22	98,22	97,04
646	95,59	95,54	99,57	646	95,47	95,47	94,69	646	98,23	98,23	99,48
634	96,52	96,47	95,71	N-GD- 652	100,0 0	100,0 0	96,59	634	95,92	95,92	95,36
671	97,07	96,99	95,63	634	96,39	96,39	95,62	671	95,75	95,75	95,54
684	96,9	96,83	95,47	671	96,88	96,88	95,69	684	95,58	95,58	95,12
611	96,83	96,75	95,54	684	96,93	96,93	95,65	611	95,51	95,51	95,19
652	96,71	96,63	95,34	611	96,85	96,85	95,57	652	95,38	95,38	94,99
692	97,05	96,98	94,71	652	97,19	97,19	95,8	692	95,72	95,72	94,35
680	96,08	96,00	95,69	692	96,85	96,85	95,65	680	94,75	94,75	95,33
675	96,89	96,81	95,45	680	95,89	95,89	94,68	675	95,35	95,35	94,96
N-GD- 675	100	99,78	96,24	675	96,49	96,49	95,29	N-Gen- Sin	110	100	97,78
N-Gen- Sin	110	110	110	N-Gen- Sin	110	110	110	N-GD- 646	100	110	110
650	106,7 9	106,7 7	106,4 9	650	106,7 5	106,7 5	106,4 8	650	106,5 8	106,5 8	106,4 5
N-632- 671	98,82	98,75	97,71	N-632- 671	98,66	98,66	97,69	N 632- 671	97,86	97,86	97,49
632	100,7 9	100,7 4	99,94	632	100,6 7	100,6 7	99,93	632	100,2 2	100,2 2	99,86

Figura 13. Resultados del flujo de carga del sistema IEEE 13 nodos.

Los efectos de la estabilidad de voltaje producidos por la GD se muestran en la figura 14 y 15 al relacionar los voltajes de nodo con las cargas, esto se hizo observando el perfil de voltaje sobre el nodo 632. Los resultados proporcionan una indicación del fenómeno de colapso de voltaje cuando se incrementan las transferencias de potencia en una región del sistema radial; sin embargo, el punto de colapso para todos los nodos en la región de estudio ocurrirá al mismo nivel de potencia, independiente de los voltajes de los nodos específicos.

Se puede observar en la figura 14 que al instalar una sola unidad de generación en los nodos 675, 652, y 646 se aumenta la estabilidad del sistema, se incrementa el factor de carga “ $\lambda$ ” comparado con el caso base donde solo se hace el flujo de carga con la unidad de generación central. Al instalar la unidad de GD en el nodo 675 la cargabilidad aumenta hasta 6,076 MW con un nivel de colapso de voltaje en 77,305 V %.

En la figura 15 donde se hace un control de operación de la máquina PQ, el nivel de cargabilidad “ $\lambda$ ” en el nodo 646 comparado con la MS, aumenta en 0,545 MW, para un nivel de colapso de voltaje de 78,419 V %. Esto indica cómo el parámetro de variación de carga “ $\lambda$ ” no depende del tiempo y a medida que  $\lambda$  varía, van cambiando los puntos de equilibrio y las trayectorias del sistema.



ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

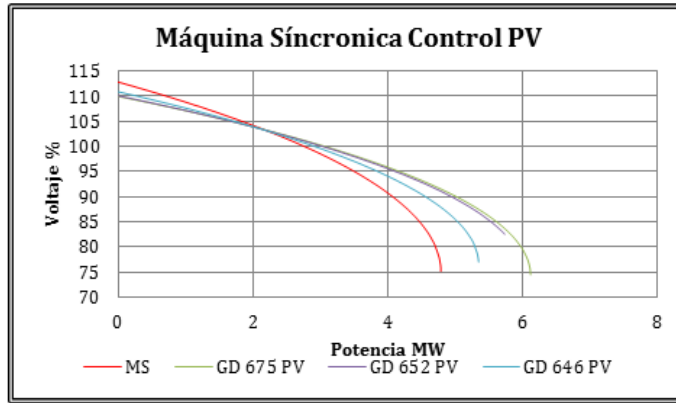


Figura 14. Control PV Nodo 632.

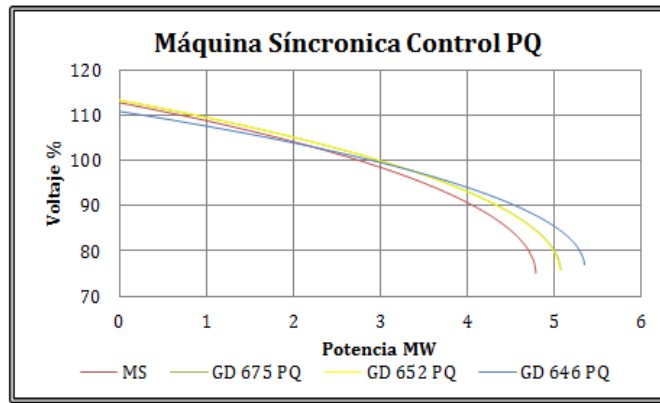


Figura 15. Control PQ Nodo 632.

El análisis de estabilidad transitoria consiste en calcular fenómenos transitorios electromecánicos y conocer si el sistema está en capacidad de volver a condiciones de operación normal luego de ser afectado con una alteración. Para el caso del sistema radial de 13 nodos, se aplica una falla trifásica en el nodo 632 mostrado en la figura 16: primero con una duración de 0,1 s y luego con una duración de 0,3 s y se analiza el comportamiento de la frecuencia en el nodo 675 para cada caso donde se agregan las unidades de GD.

Comparando los resultados y los tiempos de falla con el caso donde sólo se encuentra la unidad de generación central para una falla que tiene un tiempo de duración de 0,1 s; se observa que la desviación de la frecuencia en los nodos para el caso de control PV y PQ es mayor, por lo que ésta desviación de frecuencia se

debe a la inclusión de las unidades de GD en cada uno de ellos como se muestra en la figura 19. El nodo 652 es el que presenta la mayor desviación de frecuencia con 1,461 Hz en el modo de operación PV.

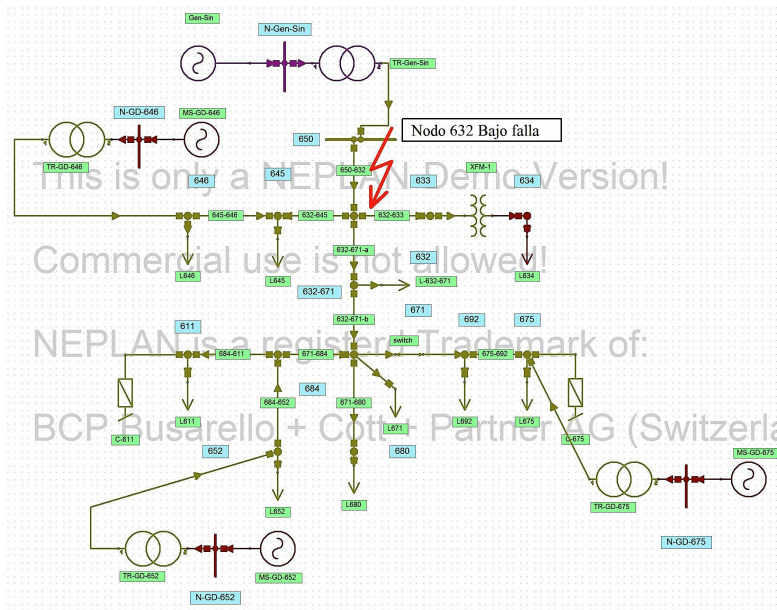


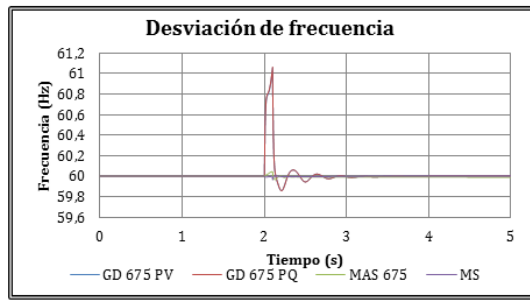
Figura 16. Nodo 632 bajo falla.

La figura 17 muestra cómo al ocurrir la falla en el nodo 632 y despejarse 0,1 s después, la frecuencia varía en el modo de operación PQ de la unidad de GD conectada al nodo 675 en 1,064 Hz, ayudando a mantener la estabilidad del sistema luego de la falla porque la máquina tiende a estabilizar la potencia reactiva inyectada para mantener el factor de potencia debido a la carga del sistema radial.

La figura 18 muestra lo que ocurre en el sistema cuando el tiempo de falla es de 0,3 s. Se observa que el sistema, en los casos en que se utiliza unidades de generación síncronas GD en el modo de operación PV y PQ, sale de sincronismo y tarda alrededor de 86 segundos en recuperarse para el caso mas desfavorable.

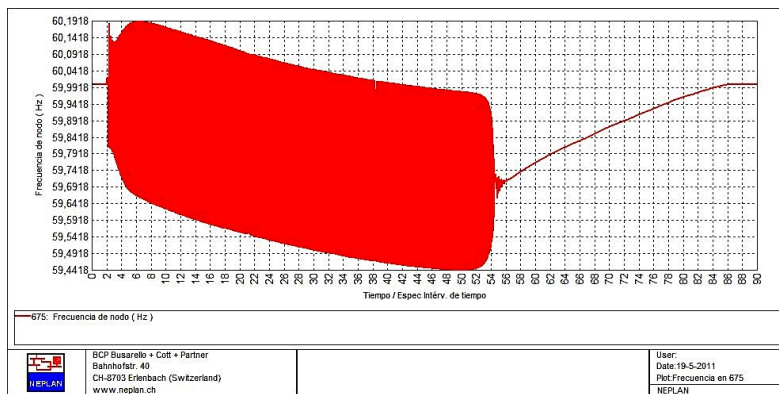
El caso más interesante es la utilización de unidades de generación asíncronas GD donde la desviación de la frecuencia en la falla de 0,1 s en el nodo 646 es apenas de 0,24 Hz por debajo de la desviación causada por la unidad de generación central, y en el caso en que la falla dura en despejarse 0,3 s se observa un incremento en la desviación de la frecuencia de 0,312 Hz en el nodo 652 que está por encima de la desviación causada en la unidad de generación central,

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN



**Figura 17.** Desviación máxima de frecuencia en el Nodo 675 al ocurrir falla en Nodo 632.

aunque el sistema se mantiene y se recupera al despejar la falla trifásica simulada en el nodo 632.



**Figura 18.** Desviación máxima de frecuencia Nodo 675 al ocurrir falla en Nodo 632.

La Estabilidad de Pequeña Señal mide la habilidad de un sistema de potencia para mantenerse en sincronismo cuando éste está sujeto a pequeñas perturbaciones. Estas perturbaciones son pequeñas si las ecuaciones que describen la respuesta resultante del sistema se pueden linealizar, con el fin de conocer el comportamiento oscilatorio del sistema. Con esto se logra determinar los valores propios de la velocidad angular de cada una de las unidades de GD utilizadas, así podemos conocer la característica dinámica inherente del sistema de potencia y por lo tanto analizar si las oscilaciones y el amortiguamiento corresponden a la condición de estado estable del flujo de carga. Los valores propios se muestran en las figuras 21 y 22 y sus correspondientes valores en la figura 20.

	GD Nodo	Falla N 632		
		0,1 s	0,3 s	
Sin GD (Hz)		0,036	0,074	
MS PV (Hz)	675	1,058	-	se recupera después de 82 s
	652	1,461	-	se recupera después de 83 s
	646	0,024	-	se recupera después de 85 s
MS PQ (Hz)	675	1,064	-	se recupera después de 82 s
	652	0,911	-	Se recupera después de 83 s
	646	0,021	-	se recupera después de 86 s
MAS (Hz)	675	0,042	0,274	-
	652	0,044	0,312	-
	646	0,021	0,270	-

Figura 19. Desviación de la frecuencia, falla en el nodo 632.

	Nodo	Frecuencia Hz	Amortiguamiento
MS PV	675	3,534	0,169
	652	3,515	0,165
	646	3,403	0,142
MS PQ	675	3,527	0,167
	652	3,523	0,166
	646	3,455	0,157
MAS	675	5,089	0,201
	652	5,089	0,202
	646	5,075	0,205

Figura 20. Frecuencia de oscilación y amortiguamiento del sistema con GD.

Las simulaciones muestran que la utilización de unidades de GD aumenta la frecuencia de oscilación del sistema de 13 nodos y estas oscilaciones de frecuencia son mas grandes cuando se usan máquinas asincrónicas del orden de 5,09 Hz, esto debido a que los generadores asíncronos no producen potencia reactiva y tienden a consumirla cuando se presentan fluctuaciones de frecuencia en la red, por lo que estas máquinas deben desconectarse lo más pronto posible, así se puede evitar un colapso en la red de distribución.

La figura 21 muestra la ubicación de los valores propios en un plano real e imaginario para las unidades de GD ubicadas cada una en los nodos 646, 652, 675 y se aprecia cómo en todos la parte real es negativa, lo que indica que si la parte real es mas grande y negativa como en el punto -53,02; el modo oscilatorio es

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN

decreciente lo cual hace que el sistema sea mas estable, aunque la utilización de excitadores en las unidades de GD incrementa el torque sincronizante pero reduce notablemente el torque de amortiguamiento, esto genera oscilaciones crecientes del ángulo de la máquina.

La figura 22 que representa los valores propios para las unidades de GD asincrónicas, muestra cómo algunos valores propios con parte real negativa están muy alejados del orden de -100; haciendo que el modo oscilatorio disminuya y el sistema sea estable. También aparecen valores propios reales positivos cercanos al origen, que representan una inestabilidad aperiódica o una oscilación que incrementa su amplitud, que a su vez es compensada por los valores propios reales negativos mas alejados del origen.

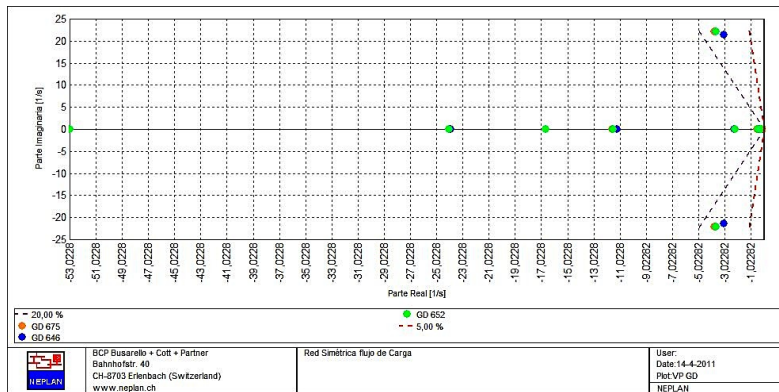


Figura 21. Valores Propios Para GD síncrona.

#### 4.2. Operación en isla

Para el análisis de la operación en isla del modelo IEEE de 13 nodos, se agregaron unidades de generación a los nodos 675 – 652 – 646 – 634. Se estudió el siguiente escenario.

El análisis consiste en una falla en el extremo del nodo 671, el cual deja la línea 684 – 671 desconectada y el subsistema con una unidad de generación de 375 kVA en el nodo 652. Esta unidad debe alimentar una carga de 300 kVA, ver figura 23. Se aplica una falla trifásica en el nodo en 2 s y el interruptor abre la línea en 2,1 s.

En este caso se observa cómo la unidad de GD soporta la falla y después que se desconecta la línea, el sistema se recupera y mantiene la estabilidad de la isla. La frecuencia al comienzo tiene una pequeña oscilación que es minimizada por el sistema de estabilización de la unidad de GD. Esto se observa en la gráfica superior izquierda de la figura 24. En la gráfica inferior derecha de la misma figura,

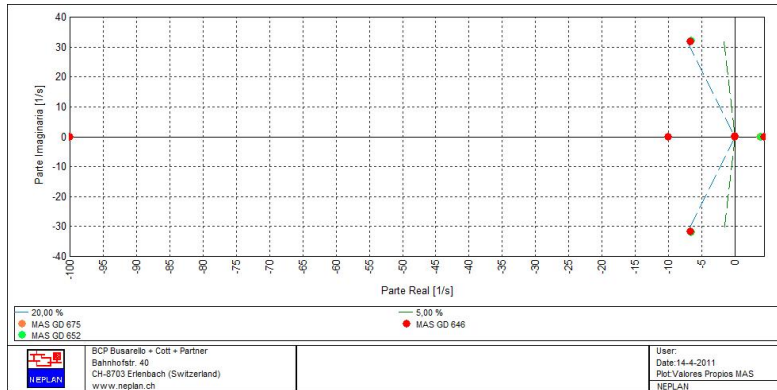


Figura 22. Valores Propios Para GD Asíncrona.

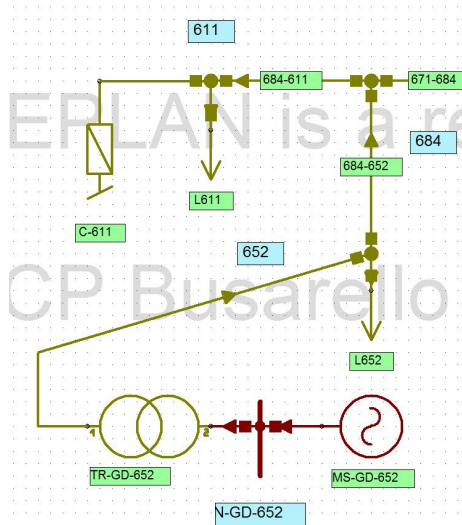
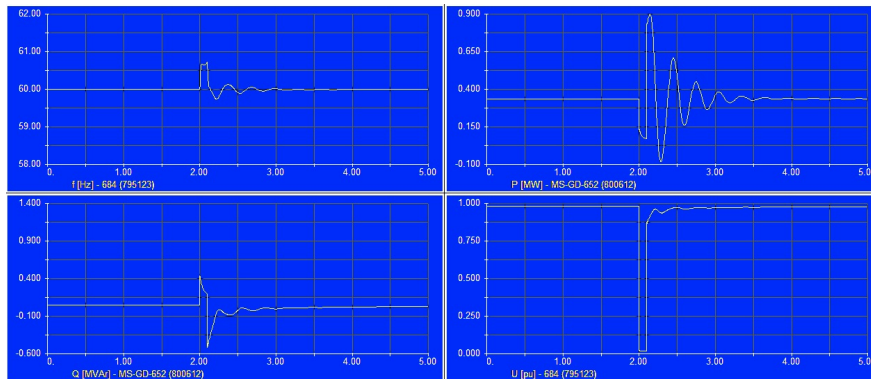


Figura 23. Isla para el sistema bajo análisis.

se observa cómo el voltaje después de caer abruptamente hasta cero, cuando se despeja la falla la unidad de GD, se recupera y no produce una pérdida del perfil de voltaje de la isla, esto debido a que la carga que tiene que alimentar la unidad de GD es menor a su capacidad nominal. La potencia reactiva nuevamente se ve compensada por los condensadores *shunt* conectados en el nodo 611.

Es muy claro que para algunos casos cuando el sistema opera en isla no es posible sostener la estabilidad de éste. Solo se logra si la unidad de generación central continúa conectada a la red de distribución y el tiempo de despeje de la falla es el mínimo. Este despeje lo realizan los interruptores controlados por los

ESTADO ESTABLE Y TRANSITORIO FUENTES DE GENERACIÓN



**Figura 24.** Simulaciones de estabilidad transitoria, potencia activa y reactiva en la unidad de GD, frecuencia y voltaje en el nodo 684.

relés de distancia y los reconectores que pueden restaurar la estabilidad de la red si al falla es despejada.

## 5. Conclusiones

El trabajo presenta una descripción conceptual general de la generación distribuida, entregando definiciones esenciales y la ventaja que brinda al ser incorporada en los sistemas eléctricos. Se discuten las distintas formas existentes para la introducción de GD en forma masiva en los sistemas de distribución.

Los análisis de estabilidad permiten conocer el comportamiento del sistema eléctrico de distribución radial al ser sometido a perturbaciones, y tienen su importancia tanto desde el punto de vista de la planificación y expansión del sistema, como el de la operación, pues sus resultados permitirán tomar las decisiones más adecuadas cuando se quieran utilizar tecnologías de GD.

Se observó en los resultados que la inclusión de unidades de GD en los nodos con grandes cargas y a su vez mas alejados en la red radial, mejora los perfiles de voltaje del sistema y la estabilidad cuando hay variaciones o incrementos de la carga.

La inclusión de diferentes tecnologías y los modos de operación PV y PQ de las unidades de GD, mejora sustancialmente el nivel de carga “ $\lambda$ ”.

La desviación de la frecuencia para unidades de GD cuando las perturbaciones de la red radial son grandes, causan inestabilidad haciendo que las plantas salgan de sincronismo. Esto se debe compensar y solucionar agregando a los esquemas de control de las máquinas PSS, que junto con los AVR minimizan las oscilaciones de las perturbaciones.

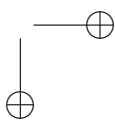
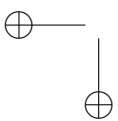
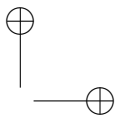
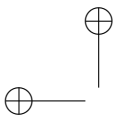
## Agradecimientos

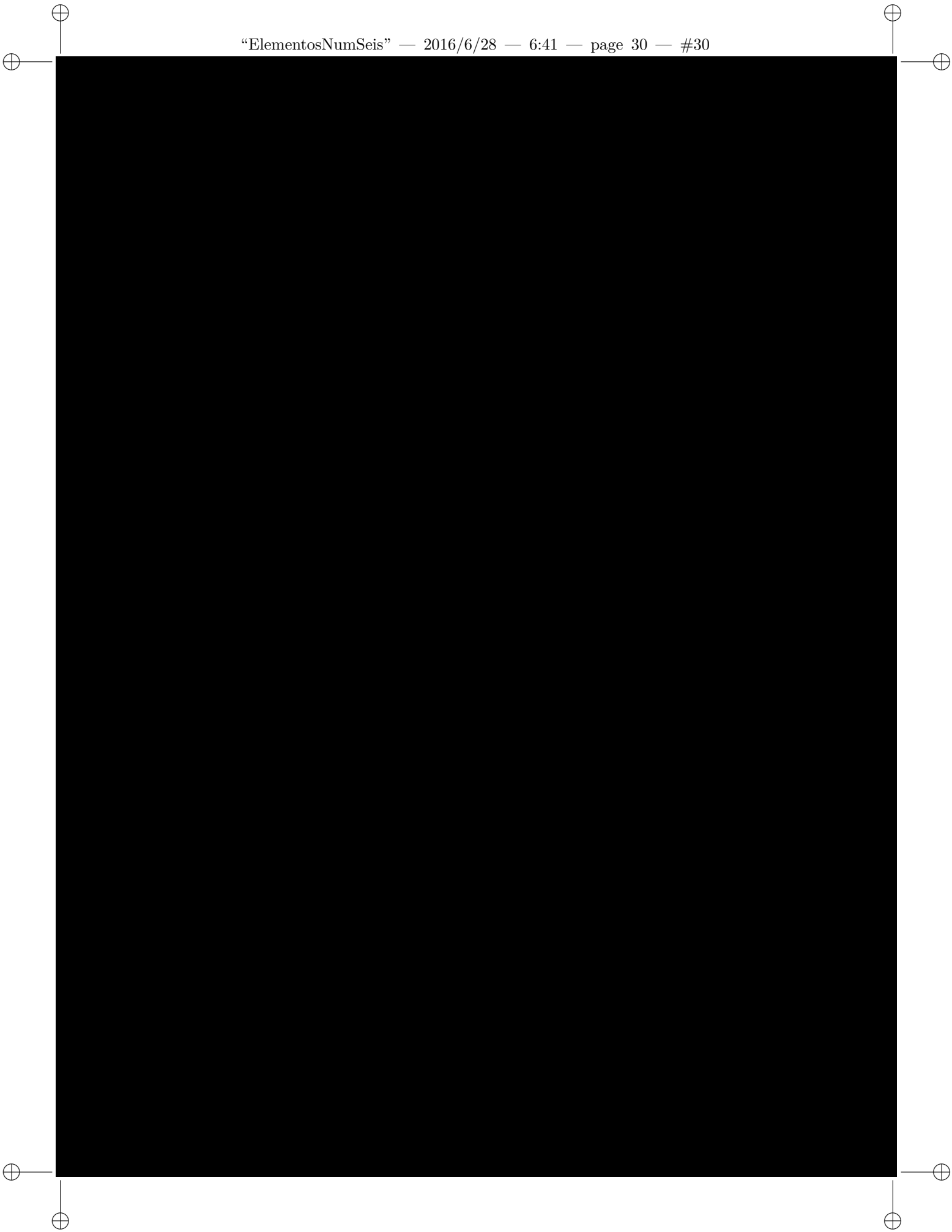
El presente documento ha sido soportado por el proyecto de investigación con código 633-11-14 financiado por la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

## Referencias

1. N. Mithulananthan and Than O. “Distributed generator placement to maximize the loadability of a distribution system”, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 43, Issue 2. 2006.
2. H. L. Willis and W. G. Scott, Distributed Power Generation: Planning and Evaluation (Marcel Dekker, New York, 2000).
3. Duque C., Marmolejo, E.D. y Ma. Teresa de Torres. Análisis de prospectiva de la generación distribuida en el sector eléctrico colombiano. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, 2003.
4. Gomez J., Vascetti J., Coyos C. Generación distribuida: tipo de conexión del transformador de interconexión. Decimo tercer encuentro regional iberoamericano de Cigré, 2009.
5. M.A. REDFERN, O. USTA, & G. FIELDING. “Protection Against Loss of Utility Grid Supply for a Dispersed Storage and Generation Unit”, IEEE Trans.
6. Dalke G., Baum A., Bailey B. Risk from utility supply disruption. IEEE industry applications magazine, 2011.
7. N.W.; Walling, R.A.; Miller. Distributed generation islanding-implications on power system dynamic performance. In IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002.
8. Distribución Eléctrica Inteligente SILICE – Fase II, CODENSA, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de los Andes, Colciencias, Septiembre de 2010.
9. *Software* Neplan. [<http://www.neplan.ch/neplanproduct/en-electricity/>].
10. Abdel-Aziz A. Fouad Paul M. Anderson. Power System Control and Stability. IEEE Press, 2003.
11. W. H. Kersting. Radial distribution test feeders. Technical report, IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, 2000.
12. IEEE Distribution Planning Working Group Report, “Radial distribution test feeders”, IEEE Transactions on Power Systems, August 1991, Volume 6, Number 3, pp 975-985.
13. IEEE Std 421.5-1992, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
14. Computer Representation of Excitation Systems, IEEE COMMITTEE REPORT, IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. P.AS-87, NO. 6 JUNE 1968.









## Centrales fotovoltaicas: contexto colombiano frente a latinoamérica continental de habla hispana

### Photovoltaic Centrals: Colombian Context with Respect to Spanish Speaking Continental Latin America

Diego Fernando Chacón Serna\*, Cristhian Mauricio Moreno Amaya\*\*, Johann  
Alexander Hernández Mora\*\*\*

Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad  
Distrital Francisco José de Caldas

FECHA DE ENTREGA: 24 DE NOVIEMBRE DE 2015

FECHA DE EVALUACIÓN: 11 DE FEBRERO DE 2016

FECHA DE APROBACIÓN: 4 DE MARZO DE 2016

**Resumen** Este artículo propone un análisis del sector fotovoltaico de cada uno de los países de habla hispana de América continental, haciendo un fragmento en regiones; Centro América y Sur América respectivamente. El crecimiento de la generación de energía eléctrica por medio de centrales fotovoltaicas ha tenido un gran impacto en el planeta y a su vez ha generado que en los últimos años Latinoamérica tenga un crecimiento importante en el uso de esta tecnología para generar energía. Sin embargo, Colombia país que hace parte de América continental de habla hispana está atrasada en los avances que se han visto de manera general en Latinoamérica en cuanto a proyectos de gran escala, proyectos a pequeña escala y normatividad que regule e incentive el uso de esta tecnología para la generación de energía eléctrica.

**Abstract** This article proposes a photovoltaic sector analysis of each one of the Spanish speaking countries of Continental America, by region fragmentation: Central and South America, respectively. The growth of electrical energy generation through photovoltaic centrals has had high impact on the planet and at the same time, has caused Latin America to increasingly use this technology during the last years to generate energy. However, Colombia (a country that is part of this group) is behind — regarding the general progress shown in Latin America— with respect to large scale, small scale, and regulation projects that standardize and promote the use of this technology in order to generate electrical energy.

\* [diegounlited@hotmail.com](mailto:diegounlited@hotmail.com)

\*\* [cmma8905@gmail.com](mailto:cmma8905@gmail.com)

\*\*\* [jahernandezm@udistrital.edu.co](mailto:jahernandezm@udistrital.edu.co)

**Palabras Clave:** central fotovoltaica, energía solar, radiación solar, incentivos, normatividad

**Keywords:** photovoltaic central, solar energy, solar radiation, incentives, regulation

## 1. Introducción

La generación mediante la tecnología solar, y su uso como fuente generadora de energía a gran escala mediante la figura de centrales y/o huertas fotovoltaicas ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos 20 años, destacándose principalmente el desarrollo en países de Europa y Norte América [1]. Este crecimiento se ha dado debido al desarrollo de políticas ambientales y la preocupación por temáticas como el cambio climático y otros efectos sufridos por el medio ambiente. Dichos aspectos han sido tratados desde la época del protocolo de Kioto y la Cumbre de Río ([2] a [4]). Por otra parte, la tecnología solar fotovoltaica ha demostrado traer consigo beneficios sociales y económicos en los lugares donde se ha implementado [5]. Todo lo anterior, sumado a la constante evolución de esta tecnología, reflejada en mejoras de rendimiento, de eficiencia y disminución de costos, ha hecho que sume cada vez más adeptos en todo el mundo [6,7].

Por su parte, este sector en Latinoamérica ha empezado a mostrar incipientes crecimientos durante los últimos dos años ([1] a [8]). Consecuentemente, para lograr un adecuado desarrollo de la tecnología en los países latinos, se hace necesario conocer no sólo de las experiencias de sociedades maduras en el tema, sino también de las diferentes políticas y enfoques que se están dando en las propias. El presente trabajo propone un análisis del sector fotovoltaico de manera individual de cada país que comprende la América continental de habla hispana, y a su vez una segmentación por regiones (Centroamérica y Suramérica, respectivamente), para así poder realizar una comparación global de lo que sucede con respecto al tema de centrales fotovoltaicas en la zona, con la situación y medidas de Colombia al respecto. Se han considerado de forma sucesiva los siguientes asuntos: potencial energético, ámbito normativo, proyectos en funcionamiento y proyecciones futuras.

## 2. Recurso de la energía solar fotovoltaica en los países de habla hispana en América continental

El recurso solar como base para la generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos posee un gran potencial en América Latina, dadas sus condiciones geográficas, climáticas [9]. La figura 1 muestra un mapa de radiación global en la región tomado de Solar Gis Maps of Global Horizontal Irradiation Latin America. Adicionalmente, el cuadro 1 muestra un resumen del rango específico de radiación que se presenta en cada uno de los países analizados en éste estudio (con su respectiva fuente de información), los cuales se han denominado “países de habla hispana de América Continental”. Es importante

## CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

destacar que algunos presentan rangos más grandes que otros, lo cual se debe a factores como la extensión del país, las condiciones estacionales y por supuesto las condiciones de cada región particular.



Figura 1. Mapa de irradiación Global Latinoamérica.

### 3. Países de centroamérica continental de habla hispana y su visión y aplicación de centrales y o parques fotovoltaicos.

#### 3.1. México

El mercado eléctrico mexicano contempla diversas actividades, y cada una de estas tiene su respectiva normativa y regulación: generación, conducción, transmisión, transformación, distribución, abastecimiento, importación y exportación de energía. Dentro de algunas éstas (generación, transmisión, distribución y comercialización), se involucran tanto entes privados como públicos ([25] a [26]). La matriz de generación energética en México es muy variada según la tecnología que se usa, pero si se mira desde el punto de vista de los recursos que utilizan esta

País	Rango de Radiación [KWh/m <sup>2</sup> ]
Argentina [10]	2-7.5
Chile [11]	3-7.5
Ecuador [12]	4.2
Guatemala [13]	3.5-7.5
Honduras [14]	3.5-6.2
México [15]	4.4-6.3
Nicaragua [16]	4-6.5
Perú [17]	3.5-6.5
El Salvador [18]	4-6
Uruguay [19]	2.1-6.7
Venezuela [20]	4-6
Panamá [21]	3.8-6.9
Bolivia [22]	4.2-6.3
Paraguay [23]	3-6.5
Colombia [24]	2.5-7

**Cuadro 1.** Rangos de radiaciones por país.

muy inclinado el uso de recursos no renovables con un 85 % aproximadamente, mostrando su gran dependencia a estas fuentes. Por otra parte, están los recursos renovables, los cuales podrían sumar ese 15 % restante, distribuido en centrales hidroeléctricas y geotérmicas principalmente, tal como se evidencia en [27]. De acuerdo con lo anterior, el país ha estado generado una política de incentivos [27], enfocada en fomentar el empleo de nuevos recursos renovables dentro de los cuales se destaca la tecnología solar fotovoltaica. Adicionalmente, dentro del país se cuenta con sector maduro empresas de buena experiencia en el área.

México, adicional a las buenas condiciones de radiación que presenta, ha logrado a la fecha una capacidad de producción anual de módulos superior a los 312 MW [28], que además de ser una gran producción desde el punto de vista económico interno haría muy viable la aplicación e implementación de esta tecnología ya que no se tendría que importar en exceso si no se podría manejar en el mercado interno mexicano, lo que se ha dado como consecuencia la ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética [29]. En el cuadro 2 se describen los proyectos identificados en México ([30] a [35]).

### 3.2. Guatemala

Guatemala es uno de los países de América central que está impulsando el uso de los recursos naturales como fuentes no convencionales para la generación de energía eléctrica. Existen varios proyectos que se están realizando actualmente mediante cooperación entre el gobierno de Guatemala y entidades privadas. Adicionalmente,

CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

Proyecto	Potencia
Aura Solar I	39 MW
Tai Durango I	16 MW
Central PV Cerro Prieto	5 MW
Parque Solar Bicentenario	2 MW
Central Solar Santa Rosalia	1 MW

**Cuadro 2.** Proyectos México.

los recursos extranjeros que llegan como inversión directa, pueden aprovechar los diferentes incentivos que decreta la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovables [36]. En el 2003 en Guatemala, entro en vigencia [36], en la cual el gobierno de Guatemala busca promover de forma activa, el aprovechamiento de los recursos naturales para la generación de energía eléctrica que permita a largo plazo, obtener un desarrollo continuo de dichas energías, con el fin de mejorar la calidad ambiental del país y llamar la atención de inversionistas en este sector. La responsabilidad del desarrollo de actividades, fomentos y utilización de las energías renovables es del Ministerio de Energía y Minas, el cual está encargado de la promoción y localización de los recursos para la generación de energía eléctrica, de impulsar los estudios para estimar el potencial técnico utilizable, de fomentar y facilitar el uso de inversiones para el desarrollo de proyectos, favoreciendo la oferta eléctrica nacional a través del uso de energías renovables y un menor uso de combustibles importados, y de facilitar los certificados para los proyectos de éste tipo que se establezcan en el país [37]. En el cuadro 3 se identifican los principales proyectos solares fotovoltaicos que actualmente se encuentran ya en funcionamiento [38,39].

Proyecto	Potencia
Planta solar Fotovoltaica Horus I	50 MW
La Planta Fotovoltaica Sibó	5 MW

**Cuadro 3.** Proyectos Guatemala.

### 3.3. El Salvador

El Salvador es un país en el cual se maneja un concepto de apertura en el mercado eléctrico en todos sus sectores (generación, transmisión y distribución), en los cuales se observa en gran medida la participación privada. En el sector de generación, Las fuentes renovables juegan un papel fundamental en el fortalecimiento

y crecimiento de la matriz energética. El CNE (Consejo Nacional de Energía), tiene como política y prioridad el desarrollo sostenible mediante las tecnologías limpias y renovables [40]. En la Ley de Incentivos Fiscales para el Fomento de las Energías Renovables en la Generación de Electricidad [41] se contemplan excepciones fiscales de acuerdo a su capacidad del proyecto. No existe límite de capacidad pero si hay una división en tres categorías, tal como lo establece el Acuerdo No 162 – E-2012 [42]; en el cual se aprueba la “Normativa Técnica para Caracterizar los Proyectos que Aprovechan las Fuentes Renovables en la Generación de Energía Eléctrica” el cual va ligado con la ley 462 anteriormente citada: “... *Artículo 6: De acuerdo al nivel de potencia o capacidad instalada de las centrales de generación eléctrica y para los fines de aplicación de esta norma, se establecen las siguientes categorías de proyectos: a) Menores de 10 megavatios (MW); b) Entre 10 y 20 megavatios (MW); y, c) Mayores de 20 megavatios (MW)*” [41].

Hacia abril de 2013, El Salvador había explotado el recurso solar fotovoltaico en pequeñas cantidades en sistemas autónomos aislados y algunos conectados a la red para autoconsumo en un número limitado de construcciones y cantidad de potencia, pero para los meses de diciembre de 2013 se puso en funcionamiento la primera planta conectada al sistema eléctrico, mediante una iniciativa llevada a cabo por la empresa RTS Energy, para mirar el comportamiento y la soportabilidad del sistema. Para estos momentos, El Salvador empieza a apostar por esta tecnología para diversificar su matriz energética, lo que hoy se ve reflejado en los principales proyectos mostrados en el cuadro 4 [43,44].

Proyecto	Potencia
La Planta Fotovoltaica Esperanza	2,88 MW
La Planta Fotovoltaica PV Salvador	70 MW

**Cuadro 4.** Proyectos El Salvador.

### 3.4. Honduras

Honduras se encuentra ubicada en el centro de Centroamérica. A pesar de su situación económica, el país cuenta con amplias fuentes de energías renovables, principalmente de origen hídrico, aunque debido a su posición geográfica, también posee un no despreciable potencial eólico, solar y geotérmico [45]. El cuadro 5 muestra un resumen de los principales proyectos en funcionamiento en el país ([40] a [52]).

La proyección, los estudios y la puesta en marcha de estos proyectos se han podido realizar gracias a que Honduras cuenta con una normatividad que incentiva el uso de energías renovables, donde se destaca principalmente el Decreto 267-98, que reformó la Ley de incentivos emitida en abril de 1998 [53].



CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

Proyecto	Potencia
Planta Solar Pavana	24 MW
Planta Solar Marcovia Fase I	35 MW
Aura Solar II	61 MW
Agua Fría	60 MW
Nacaome	73,2 MW
Valle	73,2 MW
Fotersa	70 MW

**Cuadro 5.** Proyectos Honduras.

El objetivo de este decreto es incentivar el uso de las energías renovables para lo cual brinda unos beneficios como son: a) Exoneración de pago de impuestos sobre ventas (en la construcción), b) pago de los impuestos, tasas y derechos de las importaciones (durante los estudios y construcción), c) exoneración de impuestos sobre la renta (durante los 5 primeros años de operación).

Adicionalmente, existe una actualización mediante la Ley de Promoción a la Generación de Energía Eléctrica con recursos renovables, el decreto 70-2007 [54]. Mediante de este decreto se ratifica el apoyo del gobierno para el aprovechamiento de las energías renovables como fuente de generación de energía eléctrica. Este decreto consolida las exoneraciones de pago de impuestos y demás beneficios que en el decreto 267-98 se habían impuesto, y agregan otros beneficios adicionales tales como “La dispensa del pago de impuestos por importación temporal”. Aparte de esto se menciona que las plantas de energía renovables recibirán por parte de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE), un contrato y por diez (10) años una tarifa 10 % mayor que el costo marginal de corto plazo.

En mayo del 2014, se publicó el Decreto: Ley General Para la Industria Eléctrica [55] en la que se mencionan partes importantes para el uso y aprovechamiento de las energías renovables como fuente de generación de energía eléctrica. Como se ve, el uso de las energías renovables, entre ellas la Energía solar como fuente de generación de Energía eléctrica, ha tenido un fuerte apoyo por parte del gobierno y de las entidades competentes, quienes se encargan de regular, normalizar e incentivar el uso de este tipo de energías para tal propósito.

### 3.5. Nicaragua

El sector eléctrico nicaragüense ha presentado una gran evolución desde que en 1998 se empezó a generar la apertura al sector privado, inicialmente en transmisión y distribución, y luego como era de suponerse, en el sector de generación, el cual está basado en gran parte en centrales térmicas. A pesar del interesante potencial con el que cuenta este país, son muy pocos los avances en el sector debido a la falta de estudios realizados sobre el particular. En los últimos años se ha demostrado interés por parte del gobierno para aumentar el uso de las energías renovables y su

viabilidad mostrada [56,57], pero el aspecto normativo no colabora mucho ya que la ley 532 “Para la Promoción de Generación Eléctrica con Fuentes Renovables” [58] es muy vaga y en el aspecto de las tecnologías fotovoltaicas en las diversas escalas de generación, no se dictan condiciones favorables para un desarrollo pronto de esta tecnología. Además, en el campo regulatorio para estas centrales falta fijar los límites de generación para así poder determinar a qué incentivo o incentivos se puede acceder. A pesar de estas falencias en la parte normativa y regulatoria, gracias a la inversión mayormente extranjera, Nicaragua ya cuenta con una central fotovoltaica llamada Darimba (cuadro 6), ubicada en la zona de la central del país [59].

Proyecto	Potencia
Central Fotovoltaica Darimba.	1,38 MW

**Cuadro 6.** Proyectos Nicaragua.

### 3.6. Costa Rica

La filosofía energética en Costa Rica está basada en las fuentes renovables de energía, teniendo como su fuente principal la producción de energía mediante las hidroeléctricas, aunque con una apertura a que todas las fuentes renovables de energía que puedan ser utilizadas, para así poder satisfacer las necesidades de la población costarricense y además solidificar y dar un grado de fortaleza y robustez a la matriz energética [60]. La energía solar fotovoltaica como fuente de energía es muy bien vista, ya que desde el punto de vista del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad), el país cuenta con zonas de alto potencial solar, la tecnología ha tenido un gran desarrollo y sus costos han disminuido [61]. Además, las otras tecnologías han incrementado costos y tienen implicaciones socio ambientales son mucho más complejas en cuanto a construcción e instalación.

El marco normativo de fuentes renovables no convencionales se encuentra dentro de la ley “*Generación Eléctrica Paralela o Autónoma*” [62], en donde incluyen a los parques fotovoltaicos y/o centrales fotovoltaicas. Estas se encuentran como centrales de capacidad limitada que pueden ser operadas por un agente privado o una cooperativa de electrificación rural. Además la ARESERP (Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos) estimó hace un año aproximadamente que la tarifa que se aplicaría a la energía fotovoltaica sería similar a la energía hidráulica sabiendo de antemano que la energía hidráulica maneja una franja de tarifas y el precio se deberá negociar con la Distribuidora o directamente con el ICE [63].

Actualmente, en Costa Rica una de las formas de utilizar la tecnología solar fotovoltaica es para autoconsumo, ya que se permite la venta de excedentes e

CENTRALES FOTVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

intercambios de los mismos [62]. También, para noviembre de 2012 entró en funcionamiento la primera central llamada Parque Solar Miravalles (cuadro 7), y tiene como proyecciones cercanas 2 centrales de mayor capacidad (5 MW) que saldrán a la venta propuestas por el ICE [64].

Proyecto	Potencia
Parque Solar Miravalles	1 MW

**Cuadro 7.** Proyectos Costa Rica.

### 3.7. Panamá

El mercado eléctrico panameño se caracteriza por los sectores ya conocidos generación, transmisión y distribución. Cada uno de éstos tiene características principales, y se separa en regulado y no regulado. Los sectores de la transmisión y distribución hacen parte de los regulados, y la generación de gran interés no tienen regulación, lo que hace inferir que hay libertad de precios, costos variables auditables y se puede generar venta por medio de contratos o en mercados ocasionales, todo esto bajo la responsabilidad del CND (Centro Nacional de Despacho) [65] [66]. La generación, como en otros países de la región se basa en tecnología hídrica, seguida por la térmica. Sin embargo, también es un país que muestra sumo interés por diversificar la matriz energética con fuentes renovables [66] [67], mediante centrales eólicas y fotovoltaicas. Ya existe en funcionamiento el Parque Solar Sarigua de 2,4 MW, y se prevé un potencial en proyectos con licencias definitivas entre 300MW y 350 MW, lo cual ayudaría a la diversificación de la matriz y a dar un soporte en temporadas de sequía. Además, se están promulgando leyes de incentivos para las energías renovables por separado, según la tecnología. En el caso de la solar fotovoltaica, la ley 37 “Establece el régimen de incentivos para el fomento de la construcción, operación y mantenimiento de centrales y/o instalaciones solares” [68]. En esta ley, la centra fotovoltaica se establece como la instalación de generación superior a 500kW de capacidad instalada. El cuadro 8 describe los proyectos que ya se encuentra en funcionamiento y los proyectados [69]:

## 4. Países de suramérica de habla hispana y su visión y aplicación de centrales y/o parques fotovoltaicos.

### 4.1. Argentina

El mercado eléctrico argentino, debido a la cantidad de coyunturas y problemáticas que ha vivido el país [70], es de participación mayoritariamente privado en todas

Proyecto	Potencia
Parque Solar Sarigua Licencia Definitiva	2,4 MW
Avanzalia Panama	120 MW
Panama Solar Energy Providers	45 MW
SDR Energy Panama	49,5 MW
Solar XXI	40 MW
Otros (menores (20MW))	89.592 MW

**Cuadro 8.** Proyectos Panamá.

las actividades (generación, transmisión, distribución). Sin embargo estas están estrictamente ligadas a las normativas del gobierno y los entes estatales de regulación. Así mismo, es un mercado que centraliza sus esfuerzos hacia el Gran Buenos Aires que es lugar de mayor concentración poblacional y por ende el de mayor demanda del suministro de energía eléctrica [71]. En la parte de generación, es un país basado en las fuentes térmicas, basadas a gas natural, principalmente importado de Bolivia, y dependiente de otros combustibles fósiles en el aspecto térmico. También cuenta con generación hidroeléctrica, nuclear a pequeña escala y en cuanto a fuentes de energía renovables no convencional se encuentra muy limitada su participación en la matriz energética del país. Por eso desde años recientes surgió la necesidad y la idea, bajo el programa GENREN, de diversificar la matriz de generación por parte de las fuentes renovables [72], la meta a 2019 es que el 8% de la generación total del país la aporten estas fuentes, donde entraría a participar las centrales fotovoltaicas como opción y aplicación para satisfacer esta y otras metas futuras. Inicialmente, GENREN proponía 20MW licitados para la parte solar fotovoltaica y fue modificada a 10 MW años posteriori, debido a la visión certera de la incapacidad de poder cumplirla. Gracias a la inversión privada y a los planes de cada una de las diferentes provincias en sus planes regionales energéticos, es posible decir que en la parte solar fotovoltaica la meta se sobrepasaría. Además, se ve una gran proyección en el país como causa y consecuencia de la instalación y ampliación en producción de diversas fábricas de módulos fotovoltaicos, lo que hace presumir un alza en el mercado de esta fuente energética en la zona [72]. La parte normativa y legal para este aspecto está regida por la ley 26.190 “*Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica*” [73], en la cual se plantean una serie de incentivos y beneficios que se obtendrían al invertir en estas fuentes. En el cuadro 9 se identifican algunos de los proyectos en Argentina ([74] a [77]).

CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

Proyecto	Potencia
Chimbera 1	2 MW
Parque Fotovoltaico San Juan	1,2 MW
Cañada Honda	5 MW
Terrazas del Portezuelo	1 MW

**Cuadro 9.** Proyectos Argentina.

#### 4.2. Perú

El mercado eléctrico peruano ha estado a la altura del crecimiento y desarrollo económico del país. Según el Ministerio de Energía y Minas (MIMEM) de Perú, la capacidad de generación total instalada conectada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en 2013 consistía principalmente en 23 centrales hidroeléctricas con una capacidad de 3.270 MW y 32 centrales termoeléctricas con una capacidad total de 5.260 MW. Como consecuencia de la subasta de energías renovables, cuatro (4) plantas solares con una capacidad total de generación de 80 MW también estaban en operación en el 2013 [78].

En Perú existen dos instrumentos legales que establecen el marco legal para el sector eléctrico procedente de energías no convencionales: el primero es el Decreto Legislativo No 1002 de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables [79], y el segundo es el reglamento de generación de electricidad con energías renovables, Decreto Supremo 050-2008-EM [80]. Este último establece las normativas para la promoción de los recursos de energía renovables como prioridad nacional y fomenta la conexión de la electricidad procedente de energías renovables. En este también se establece una máxima cuota quinquenal de la demanda de energía que debe satisfacerse con electricidad procedente de los recursos de energías no convencionales. Adicionalmente, también se establecen los incentivos fiscales para el uso de las energías renovables, los cuales consisten en que toda la generación de electricidad que se realice a partir de fuentes no convencionales tiene derecho a una amortización acelerada del 20 % sobre el impuesto de renta. Esta amortización acelerada aplica para los equipos, maquinarias, instalaciones y operación de las centrales con generación de energía renovables, y los generadores tienen derecho al reembolso antes de plazo del impuesto al valor agregado (IVA) por la venta de electricidad.

Por otra parte, el segundo instrumento que existe en Perú como normativa aplicada a las energías renovables es la *Norma Técnica Peruana* (NTP) [81], que establece la regulación de los equipos de energía renovables para sistemas solares fotovoltaicos de hasta 500 Wp de potencia, pero este instrumento aplica para instalaciones domiciliarias. El cuadro 10 describe los proyectos solares fotovoltaicos que se encuentran en operación y los que están proyectados ([82] a [90]).

<b>Proyecto en Operación</b>	<b>Potencia</b>
Panamericana Solar	20 MW
Tacna Solar	20 MW
Majes Solar	20 MW
<b>Proyectados</b>	
Central Solar Arepa	30 MW
Central Solar La Joya	100 MW
Central Solar Pampa Colorada	100 MW
Central Solar Pampa Las Pulgas	40 MW
Central Solar Rampa Siguas	40 MW
Central Solar Tesoro	40 MW

**Cuadro 10.** Proyectos Perú.

#### 4.3. Ecuador

El mercado eléctrico ecuatoriano se ha caracterizado por tener tanto intervención estatal como privada en los diferentes sectores del mercado, como lo son la generación y comercialización, con un ente regulador estatal (CONELEC). En generación, su matriz energética está principalmente dividida en partes muy proporcionadas entre la tecnología térmica e hídrica [91]. En los últimos años se ha emprendido la política de fomentar implementar y explotar los recursos renovables y dejar la dependencia por parte del sector térmico, ya que los combustibles para estos generadores son generalmente importados, lo cual generan un gran impacto económico en el país [92]. Inicialmente, por medio de las fuentes eólica y geotérmica se generaron varios proyectos. Igualmente, se esperaba que sucediera lo mismo con la tecnología solar fotovoltaica, pero al darse una gran inversión estatal en megaproyectos hidroeléctricos esto ha sido pausado, y lo que se ha emprendido es una ampliación en la generación hídrica. En el cuadro 11 están los proyectos constituidos como parque, planta y/o central Fotovoltaica ([93] a [95]).

<b>Proyecto</b>	<b>Potencia</b>
Planta Solar Fotovoltaica Santa Elena	25 MW
Planta Solar Tierra del Sol	28 MW
Salinas	1 MW
Tren de Salinas	2 MW

**Cuadro 11.** Proyectos Ecuador.

#### 4.4. Uruguay

Como es característico en la región, el sector eléctrico uruguayo ha sufrido un proceso de desintegración vertical del mercado, y dentro de su propio mercado se ha creado un ámbito de libre competencia en las actividades de generación y comercialización de energía eléctrica, fijando el rol del estado como ente regulador y administrador del mercado [96]. En la parte de la generación, como es característico en la región del río de la plata, hay una gran división en las fuentes de generación casi proporcional en generación hídrica y térmica [96]. En esta última hay gran dependencia de los combustibles fósiles y una pequeña participación los combustibles de la biomasa. En cuanto a política energética, el país también optado por busca diversificar la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales [97] [98]. Adicionalmente, mediante el *Plan Solar* [99] se busca concientizar a la población de Uruguay con respecto a la eficiencia energética. Todo esto incentivado por la *Ley de Promoción y Protección de Inversiones* [100]. A la fecha, Uruguay cuenta con el siguiente proyecto del cuadro 12 [101].

Proyecto Aprobado	Potencia
Proyecto Energía Solar La Jacinta	65 MW

**Cuadro 12.** Proyectos Uruguay.

#### 4.5. Bolivia

El sector eléctrico boliviano, como en todos los países que se han mencionado, cuenta con una Ley referente a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica: *Ley No 1604 de Electricidad de 1994* [102]. En el Artículo 5 de esta Ley se contempla el aprovechamiento de los recursos naturales, en los que se menciona el agua y otros recursos naturales renovables destinados a la producción. Sin embargo, no hay mucho que decir de esta Ley en lo que respecta a la regulación, normatividad y promulgación de incentivos para promover el uso de energías renovables como fuente de energía para la generación de energía eléctrica. Esto sucede ya que más del 50% de la generación se realiza por medio de centrales termoeléctricas a base de carbón, y el restante por medio de centrales hidroeléctricas. Por otra parte, existe un plan gubernamental de electrificación solar enfocado únicamente a proyectos a pequeña escala, aislados con fines residenciales para las zonas que presentan difícil acceso, o zonas no interconectadas [103]. A pesar de que no existe alguna regulación, Bolivia cuenta con un proyecto solar fotovoltaico (cuadro 13) [104].

Proyecto	Potencia
Planta Solar Pando	5 MW

**Cuadro 13.** Proyectos Bolivia.

#### 4.6. Paraguay

El país Paraguay, se caracteriza por tener una única empresa eléctrica integrada verticalmente: ANDE [105]. El parque generador del Sistema Eléctrico Nacional está conformado por dos Centrales hidroeléctricas: Itaipú y Yaciretá, ambas de carácter binacional, por la Central Hidroeléctrica Acaray que es de carácter nacional, y algunos grupos pequeños de Centrales Térmicas [106]. En su marco político, contempla la *Ley 3009* de la producción y transporte independiente de energía eléctrica [107], en la cual se establece la producción independiente de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía. Sin embargo, para esta Ley no se contempla algún decreto reglamentario relacionado con incentivos para la promulgación de la generación de energía eléctrica con fuentes no renovables. Este país no cuenta con algún proyecto solar fotovoltaico aprobado o en proyección.

#### 4.7. Venezuela

Venezuela es un país en el cual la generación de energía eléctrica está conformada por un 62 % con Centrales Hidroeléctricas, un 35 % con Centrales Térmicas y un 3 % corresponde a Centrales de generación distribuida, conformada por grupos electrógenos [107]. El país Venezolano no cuenta con una Ley regulatoria para la aplicación de la generación de energía eléctrica por medio de fuentes de energías renovables no convencionales. Sin embargo se dice que el estado Venezolano ha estado impulsando varias acciones de fomento y desarrollo de las energías renovables, en la cual se contempla la construcción de dos parques eólicos ubicados en la parte costera noroccidental, con una capacidad de generación de 200 MW [108]. En el mismo contexto, en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, existe un programa llamado Sembrando Luz, el cual está destinado a proveer de energía eléctrica a zonas aisladas y no interconectadas [109]. Aparte de estos proyectos, Venezuela no cuenta con más proyectos solares fotovoltaicos existentes.

#### 4.8. Chile

En la década de los 40 Chile enfrentó la necesidad de electrificar el país, tema que lo solucionó con la creación de ENDESA [110]. De esta manera fue como los sistemas aislados fueron constituyendo lo que se conoce como el sistema interconectado del norte grande (SING) [111] y del central (SIC) [112]. A partir de esto, se lleva a cabo la desintegración vertical del sector, separando las actividades



CENTRALES FOTVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. A diciembre de 2012, el SIC sumaba una potencia instalada de 13.454 MW, y cuenta con las tres cuartas partes de la potencia instalada a nivel nacional y abastece a más del 90% de la población. Por su parte el SING suma una potencia instalada de 4.581 MW, y cuenta con una cuarta parte de la potencia instalada a nivel nacional, y a diferencia del resto del país, está constituida casi exclusivamente por centrales termoeléctricas. Estos dos sistemas entregan una capacidad instalada total de 18.277 MW, lo que descontando de sus consumos propios, constituye una capacidad neta instalada alrededor de los 17.000 MW. En la edición 39.525 del Diario Oficial de la República de Chile del 1 de diciembre de 2009 [113], se crea el comité de asignación de fondos a energías renovables no convencionales. La parte normativa y legal está regida para este aspecto por la *Ley 20257 Ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales* [114]. En el cuadro 14 están los proyectos en operación y en fase de construcción ([115] a [125]).

<b>Proyectos en construcción</b>	<b>Potencia</b>
Ravsoe Planta Solar Fotovoltaica	37 MW
Pampa Solar Norte PV	91 MW
El Tamarugo Solar Granja	22 MW
El Chañar Solar	22 MW
Laberinto Solar	72 MW
Sol De Loa	110 MW
Chaka PV	20 MW
Complejo Solar PV	90 MW
Huerta Solar PV	8 MW
<b>Proyectos en operación</b>	
Maria Elena	72 MW
Amanecer	100 MW

Cuadro 14. Proyectos Chile.

## 5. Comparación de los marcos regulatorios para la energía solar fotovoltaica en los países de habla hispana del continente americano

En esta sección se muestra una visión general y descriptiva del marco normativo y/o regulatorio de cada país y su influencia en el desarrollo de proyectos de centrales fotovoltaicas. Se presenta un breve análisis de lo que sucede en el marco normativo de cada país en el aspecto renovable y por ende influye en el concepto

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

de centrales fotovoltaicas, para así poder identificar tendencias normativas y/o regulatorias por región, e identificar porque hay países con mayor inversión y surgimiento en esta tecnología que otros.

### 5.1. México

*Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.*

- Se hace una diferenciación entre las fuentes con capacidad superior a los 2,5 MW y las que no, donde las de mayor capacidad adquirirán compromisos sociales con las comunidades cercanas al proyecto.
- No se establece un límite de capacidad para las diversas fuentes incluidas en esta ley exceptuando las fuentes hídricas, superiores a 30 MW.
- Se busca la reducción de la dependencia de México de los hidrocarburos como fuente primaria de energía.
- Se crea el Fondo para la transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía; con el propósito de potenciar el financiamiento e inversión en las Energías Limpias.

### 5.2. Guatemala

*Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.*

- Todas las fuentes renovables tienen derecho a ciertos incentivos desde que cumplan los requerimientos por ley, y cumplan el proceso de evaluación y clasificación del proyecto.
- Los incentivos se identifican en el decreto 52-2003, los cuales son:
  1. Exención de derechos arancelarios para las importaciones, iva.
  2. Exención del pago del Impuesto Sobre la Renta. Durante un periodo de 10 años.
  3. Exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias. Durante un periodo de 10 años.

### 5.3. El Salvador

*Ley de Incentivos Fiscales para el Fomento de las Energías Renovables en la Generación de Electricidad.*

- Se establecen los siguientes beneficios e incentivos fiscales:
  1. Exención del DAI (Derechos Arancelarios de importación) durante 10 Años para proyectos de hasta 20 MW.
  2. Exención del pago de renta, durante 5 años a proyectos entre 10 y 20 MW; y 10 años a proyectos menores a 10 MW.
  3. Exención total de pago de impuestos sobre los ingresos provenientes de las ventas, Reducciones Certificadas de Emisiones.

## CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

4. Proyectos superiores a 20 MW tendrán deducción de pago de renta, durante máximo 10 años.
  5. Deducción en créditos fiscales.
- Se caracterizaran los proyectos en: Menores a 10 MW, Entre 10 y 20 MW, y Mayores a 20 MW.

### 5.4. Honduras

*Ley de Incentivos; Ley de Promoción a la Generación de Energía Eléctrica con recursos renovables. (Decreto 267-98; Decreto 70-2007)*

- Exoneración de pago de impuestos sobre ventas (en la construcción).
- Pago de los impuestos, tasas y derechos de las importaciones (durante los estudios y construcción).
- Exoneración de impuestos sobre la renta (durante los 5 primeros años de operación).

### 5.5. Nicaragua

*Ley No. 532: Ley para la Promoción de la Generación Eléctrica con Fuentes Renovables.* Se establecen los siguientes beneficios con tal de promover las fuentes renovables:

1. Exoneración del pago de los Derechos Arancelarios de Importación (DAI).
2. Exoneración del pago del IVA.
3. Exoneración de impuesto sobre la Renta.
4. Exoneración de todos los impuestos municipales vigentes.
5. Exoneración de todos los impuestos que existan por explotación de riquezas por un periodo de 5 años.
6. Exoneración del impuesto Timbres Fiscales (ITF).

### 5.6. Costa Rica

*Ley 7200: Ley que Autoriza la Generación Eléctrica Autónoma o Paralela.*

- Se establece el límite de capacidad a las fuentes no convencionales de energía el cual es 20 MW.
- Se tendrán exenciones fiscales en la importación de maquinaria.

### 5.7. Panamá

*Ley 37: Ley que Establece el Régimen de Incentivos para el Fomento de la Construcción, operación y mantenimiento de centrales y/o Instalaciones Solares.* Diferencia las centrales fotovoltaicas en, Pequeñas Centrales Particulares De Energía Solar cuya capacidad será de 500 MW máximo y Sistemas de Centrales Solares cuya capacidad es superior a 500 MW. Se establecen una serie de incentivos para el uso de esta tecnología los cuales son:

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

1. Exoneración de impuestos por importación.
2. Crédito fiscal aplicable sobre la renta liquidada en la actividad en un periodo fiscal determinado, por un máximo del 5 %, del valor total de la inversión.
3. Utilización del método de depreciación acelerada.

#### 5.8. Ecuador

*Regulación No Conelec-001/13* Define el uso de la energía solar fotovoltaica, mas no estipula límites, incentivos con respecto a esta fuente de generación. Venezuela. Carece de normativas y leyes para la producción de energías alternativas.

#### 5.9. Perú

*Decreto Legislativo No 1002: Decreto Legislativo De Promoción De La Inversión Para La Generación De Electricidad Con El Uso De Energías Renovables.* Se planteó con el fin de mostrar el interés por el desarrollo de nuevas fuentes mediante recursos renovables, y así mejorar la calidad de vida de la población y proteger al medio ambiente, promoviendo el uso de estas nuevas tecnologías, mediante los siguientes decretos:

- D.S No 012-2011-EM, aprueba el reglamento de generación de electricidad con energías renovables.
- D.S No 020-2013-EM, aprobó el reglamento para la promoción de la inversión eléctrica en áreas no conectadas a red.

#### 5.10. Bolivia

Carece de normativas y leyes para la producción de energías alternativas.

#### 5.11. Uruguay

*Ley 16.906 Ley de Promoción y Protección de Inversiones. (Decreto No 354/009)* En la cual se soporta los beneficios de inversión y beneficios fiscales que tendrán las actividades que sean destinadas al sector productivo como lo es la generación eléctrica, dando cabida a la inversión privada, pública o mixta, mediante los siguientes decretos:

- Decreto No 113-013, donde se considerara a efectos del despacho las centrales fotovoltaicas con un costo variable.
- Además se hace una división por franjas explicada a continuación:
  1. Franja1: 500 MW a 1000 MW.
  2. Franja2: 1 MW a 5 MW.
  3. Franja3: 5 MW a 50 MW.
- Además se encuentran decretos directamente asociados para la energía solar fotovoltaica, los cuales son:
  1. Decreto 173/010 para micro generación.
  2. Resolución 1895/010 para bajas potencias.
  3. Resolución 1895/010 para altas potencias.

CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

### 5.12. Paraguay

*vLey 3009: De la Producción y Transporte Independiente de Energía Eléctrica.* Establece a producción independiente de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía.

### 5.13. Argentina

*Ley 26.190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica.* Establece como objetivo alcanzar un 8% de participación de las energías renovables en el país. Se contemplan algunos beneficios arancelarios como:

1. Devolución anticipada y amortización acelerada dispuestos en la ley 25924.
2. Exenciones en IVA, e impuesto a las ganancias; dispuesto en la ley 25063.

### 5.14. Chile

*Ley 20.257. Introduce Modificaciones A La Ley General De Servicios Eléctricos Respecto De La Generación De Energía Eléctrica Con Fuentes De Energías Renovables No Convencionales.* No establece límites de capacidad, pero si la capacidad es mayor a 200 MW para comercializar o distribuir con el cliente final, sean o no sean regulados deberá garantizar que al menos el 10% de la generación proviene de fuentes renovables no convencionales.

## Discusión

Como se puede observar hay una gran congruencia en el sector eléctrico de Centroamérica, ya que todos los países comprendidos por esta región están apostando en una misma dirección: buscan la diversificación de su matriz de generación ampliando el aporte de las fuentes de energía no convencionales de energía, como lo pueden ser las centrales fotovoltaicas. Además, para esta región continental y de habla hispana que comprende los países desde México hasta Panamá, el marco legal y regulatorio es muy afín, y con una perspectiva clara, impulsando el uso de estas fuentes mediante incentivos, lo que invita la inversión extranjera: de esta misma parte la apertura a agentes privados a la participación de este proceso. Esta motivación por medio de incentivos es de uso generalizado en centro américa y cada país cuenta con sus propias entidades estatales que regulan y evalúan los proyectos que están sujetos a estos beneficios. Otra diferencia que se encuentra en esta región, es la determinación del límite de tamaño para los generadores. También se resalta el caso panameño, el cuál es el único país de la región que tiene una ley específica para centrales fotovoltaicas.

Por su parte, la región suramericana no tiene un marco regulatorio fuerte con respecto a las fuentes de energía renovables no convencionales como se evidencia en la tabla anterior, aunque en algunos casos se pueda aseverar que la intención de que estas fuentes ingresen en su matriz energética sea más fuerte y de concepto más amplio que en otros.

## 6. Observacion del contexto colombiano

Haciendo una comparación y observación de las normas, incentivos y marcos regulatorios de la Generación de Energía Eléctrica por medio de fuentes Renovables No Convencionales en los países de habla hispana de Latinoamérica, con la situación actual en el marco regulatorio de Colombia se pueden establecer ciertos criterios comparativos del país con el contexto general de la región. En primer lugar, se observa como punto general que los países de la parte central de Latinoamérica comparten el mismo contexto para los incentivos y políticas para el uso de las Energías Renovables: Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá en sus Leyes correspondientes decretan un artículo para los incentivos como exoneraciones de impuestos como del IVA, o los de importación de equipos y maquinaria con fines para el uso de esta tecnología entre otros. México por su parte en su Ley no especifica incentivos, pero sin embargo si especifica la creación del Fondo para la transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía con el propósito de potenciar el financiamiento e inversión en las energías limpias.

Por otro parte, en cuanto a las limitaciones de capacidad para las centrales solares fotovoltaicas y/o parques solares fotovoltaicos se establece en la mayoría un límite de capacidad de 20MW, con algunas excepciones como México, Guatemala, y El Salvador en donde no se éstos establecen límites de capacidad.

En cuanto a América del Sur de hispana existe cierta particularidad, pues se puede observar que pocos países de este sector están involucrados totalmente con el tema. Tal es el caso de Argentina, Chile y Uruguay, que en sus marcos regulatorios describen de una forma más explícita todo lo relacionado con la regulación de las Energías Renovables y son los únicos que establecen incentivos para el uso y aplicación de la generación de energía eléctrica por medio de éstas. Aunque no son del todo específicas, se mencionan ciertos incentivos como la exención de impuestos de IVA, e impuestos a las ganancias, entre otras. Adicionalmente, las regulaciones de estos países, son las únicos que mencionan si existe o no una limitación de capacidad para las centrales solares fotovoltaicas: en Chile no se establece un límite de capacidad y Uruguay establece unas franjas límites hasta 50MW. En el caso opuesto, Bolivia y Venezuela carecen de normativas y leyes para la producción de energía eléctrica por medio de energías alternativas.

En cuanto a la situación actual de Colombia se puede mencionar que existe la *Ley 1715* [126], por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, la cual entró en vigencia el 13 de Mayo de 2014. Tiene por objetivo “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 ley se estipulan las competencias administrativas de las entidades del gobierno como el Ministerio de Minas y Energía, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), el Ministerio de Hacienda y Crédito, entre otras, para la promoción de los proyectos con FNCE, cada una de estas con funciones

## CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

específicas. También se resalta resaltar una intención del uso de las FNCER para generación a pequeña escala, y una política de instrumentos tributarios de promoción dentro de éste tipo de proyectos, donde se destacan la deducción de hasta el 50 % del valor de los proyectos vía el impuesto de renta y depreciación acelerada de Activos. En cuanto a la Generación Solar Fotovoltaica, el Artículo 19 habla en específico de éste sector.

Es importante resaltar que a la efectividad de estas propuestas establecidas en la ley dependerá en gran medida de la reglamentación técnica que se desarrolle por la CREG, la cual a la fecha aún sigue pendiente.

Por otro lado surgen opiniones y recomendaciones de los agentes del mercado con respecto a la ley las cuales no se puede dejar de lado, por ejemplo algunas de sus recomendaciones son [127]:

- Tener más claridad en cuáles son las fuentes renovables a promover, que incentivos tendría cada una y cuál sería el mecanismo de priorización entre ellas.
- En la parte de incentivos, no establecer un límite de reducción de renta ya que la inversión en equipos para FNCE puede ser muy alta y esto podría desestimular la inversión; por otro lado el beneficio de exclusión del IVA debe ser más general, ya que al manejar una lista en específico, se limita las características propias de un proyecto de investigación y desarrollo.

De acuerdo con lo anterior, se observa que la intención central de Ley 1715 de 2014, no difiere mucho en cuanto a las normativas regulatorias que se encontraron en los países de habla hispana en Latinoamérica, que ya tienen alguna historia en el fomento y motivación a proyectos con energías renovables, enfocados a la generación de electricidad con energía solar fotovoltaica. En la mayoría de estos países, lo que se puede ver en común es la participación tanto del gobierno como de entidades privadas, el apoyo de organizaciones internacionales y reglas claras en lo relacionado con los incentivos, procedimientos, adecuaciones, límites y condiciones afines para las fuentes de energía renovables. Por su parte en Colombia, a pesar de haberse cumplido el plazo especificado, a la fecha todavía no existe la reglamentación que permita conocer claramente las condiciones para el mercado fotovoltaico. Entre estas condiciones desconocidas se destacan la ausencia de algún límite en KW o MW para grandes proyectos, la forma de acceso a los incentivos tributarios y los escenarios de mercados para los posibles excedentes de energía para usuarios auto generadores. Adicionalmente, se observa que el enfoque de dicha ley está dado únicamente a proyectos residenciales, comerciales e industriales y no a generadores exclusivos es decir, tampoco se conoce aún si los proyectos privados que generen energía eléctrica por medio de energía renovable no convencional, podrán aportar energía a la red de transmisión y distribución. Por otra parte, tampoco se fijan metas para que en un tiempo determinado la generación de electricidad sea cien por ciento (100 %) con fuentes de energía renovables, como si lo indican muchas de las normativas de otros países de habla hispana en Latinoamérica.

Finalmente, es de destacar que en Colombia existe un gran territorio nacional que no se encuentra interconectado a la red nacional de electricidad, zonas

conocidas como ZNI (Zonas No Interconectadas) y uno de los objetivos que persigue esta Ley es dar energía a éstos sitios ya sea por medio de fuentes no convencionales. Sin embargo, aún no es claro cómo se va a realizar ésta tarea, porque como se mencionó anteriormente, no se habla de proyectos a mediana o gran escala, que puedan contribuir a que estas zonas lleguen a tener la prestación del servicio.

## 7. Conclusiones

Las energías renovables son un punto de fuerte potencial para el desarrollo de la nueva era de los países, en cuanto a los ámbitos social, político, económico y ambiental. En una era en donde se han visto todos los efectos que ha causado el cambio climático por culpa de los gases de efecto invernadero, y del uso ineficiente e irracional de la energía, es necesario aprovechar al máximo los recursos que brinda el suelo, el aire, el agua, el sol, etc., como recursos de fuentes de energía renovables no convencionales, para la generación de energía eléctrica.

Es de gran importancia e indispensable que el gobierno, conformado por sus diferentes entes para el control, regulación y creación de leyes, haga presencia y sea quien tome la iniciativa de buscar alternativas para que se incentive el uso de estas energías limpias para la generación de energía eléctrica, a través de una regulación efectiva de la ley 1715.

Como se ha observado, las tecnologías limpias y renovables, no son tan nuevas como se cree en el continente latinoamericano. La mayoría estos países han venido trabajando desde hace tiempo en sus marcos regulatorios, y han implementado proyectos y directrices propias y en algunas casos como región, tal como se puede ver en similitud de las políticas en el continente centroamericano, la cual es la zona donde se ha podido observar el mayor crecimiento de centrales fotovoltaicas, a través una constante inversión tanto pública como privada. Sin embargo, es evidente que se observa que aún falta un largo camino para cumplir la meta de que la generación de energía eléctrica sea del 100 % con recursos renovables. Ya que Centroamérica fue visto como región y sus políticas van ligadas y estructuradas de esa manera, se encuentra un gran contraste con la parte de países en éste estudio pertenecientes a Sur América, en donde sí se buscan objetivos y metas en cuanto a generación de energía eléctrica mediante recursos renovables, pero de forma muy particular, donde cada país va en una propia dirección. Este contexto diverso en cuanto a políticas y marco regulatorio, bien podría ser una de las causas del poco progreso en ésta región en cuanto al tema en donde se resaltan falencias en diversos aspectos como en la infraestructura, o en la parte regulatoria y de incentivos promotores de estas fuentes.

En el contexto colombiano, existe la ley 1715 de 2014, en la que se establece el uso de recursos renovables no convencionales para la generación de energía eléctrica, y en donde aparecen una serie de incentivos, como exenciones fiscales, entre otros. Sin embargo, es vital que se establezca su reglamentación, ya que sin ésta será imposible desarrollar el sector fotovoltaico tal como se está haciendo en los países vecinos. Adicionalmente, esta reglamentación deberá evidenciar una



CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

clara aplicación para proyectos a gran escala, como Parques Solares Fotovoltaicos, ya que como está actualmente formulada la ley, se observa un enfoque solo a proyectos pequeños para el uso residencial, comercial e industrial como auto generadores para su propio consumo. Es evidente que por algo se debe iniciar, pero la meta, aprovechando al máximo los recursos naturales que Colombia tiene, debería ser llegar a que el 100 % de la energía eléctrica que se consume, sea producida por recursos de energía renovables no convencionales. Por esta misma razón, se debería ampliar la cobertura para que la aplicación de esta Ley, acoja tanto proyectos pequeños como proyectos de gran escala.

## Referencias

1. REN21 (2014). Renewables 2014 Global Status Report.
2. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2011). Fuentes de Energía Renovables y Mitigación Del Cambio Climático.
3. Naciones Unidas (1998). Protocolo De Kyoto De La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático.
4. Naciones Unidas (1992). Declaración de Rio sobre el Medio Ambiente y Desarrollo.
5. IRENA (2014). The Socio-economic Benefits of Solar and Wind Energy.
6. IRENA (2014). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2014.
7. BNEF (Bloomberg New Energy Finance) (2014). Q4 2014 Global PV Market Outlook, BNEF, London.
8. IRENA (2015). Renewable Energy in Latin America 2015: An Overview of Policies.
9. H.D. Kambezidis (2012). Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, from Comprehensive Renewable Energy, Volume 3, 2012, Pages 27-84, Current as of 20 April 2015.
10. Dr. Prof. Arq. John Martin Evans (2010). “Hábitat y Energía” Jornada: Energías Renovables para la Ciudad de Buenos Aires en el marco del Cambio Climático. Defensoría del Pueblo, Buenos Aires.
11. Reinhold Schmidt (2008). “Curso Energía Fotovoltaica Aspectos técnicos y aplicaciones”. Centro Tecnológico Nuevos Horizontes, Chile.
12. CIE (Corporación para la Investigación Energética), CONELEC. ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.
13. Ing. Químico Víctor Herbert De León Morales (2008). “Generación Eléctrica Fotovoltaica En La Facultad De Ingeniería Usac Y Estudio Del Aprovechamiento” M.S Tesis, Universidad De San Carlos De Guatemala.
14. José Manuel Flores (2006). “Estado Actual De La Energia Solar En Honduras: Investigación Exploratoria”, Universidad Nacional Autónoma De Honduras.
15. Ing. Ricardo Saldaña Flores, Fís. Ubaldo Miranda Miranda (2005). “Estudio De Los Potenciales Bioenergético, Eólico, Minihidráulico Y Solar En México”.
16. Carlos Martínez Catedra (2007). “Estudios de Necesidades y Recursos Energéticos de Comunidades Aisladas en Nicaragua”. Escola Técnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona.
17. Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología (2004). “Atlas de Radiación Solar Perú” 2004.
18. Mauricio Ayala, Ismael Sánchez, Arturo Escalante, Willian Marroquín (2005). “Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador” Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales (MARN), Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA), Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET/MARN).

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

19. Dr. Gonzalo Abal (2010). “Estimación de la irradiancia solar diaria promedio en Uruguay” Universidad de la República Montevideo, Uruguay.
20. Fausto Posso, Juan Herranz (2011). “Estudio Sobre La Utilización De La Energía Solar Fotovoltaica En Hogares Rurales De Venezuela” Caracas.
21. Ministerio de Economía y Finanzas, República de Panamá (2001). “Sistemas Solares Fabricados e Instalados en América Central”.
22. Marcelo J. Lucano, Iván E. Fuentes (2010). “Evaluación Del Potencial De Radiación Solar Global En El Departamento De Cochabamba Utilizando Modelos De Sistemas De Información Geográfica e Imágenes Satelitales” Revista Boliviana De Física 16, 13-21.
23. Viceministerio de Minas y Energía (2013). Radiación Solar Promedio. Ande 2013.
24. UPME. Atlas de Radiación Solar de Colombia.
25. SENER (Secretaria de Energía) (2013). Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027.
26. Gilberto Alfaro, David Jiménez, Arturo Saavedra (2014). “La Reforma Energética y el Sector Eléctrico en México” KPMG.
27. Ramos Gutiérrez Leonardo De Jesús, Montenegro Fragoso Manuel (2012). “La Generación De Energía Eléctrica En México” XXII Congreso Nacional De Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012.
28. SE (Secretaria de Economía) Energías Renovables, Unidad de Inteligencia de Negocios. 2013.
29. Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. México.
30. Arianna Galan (2015). “Aura Solar I Photovoltaic Plant, Mexico” Zofnass Program for Sustainable Infrastructure 2015.
31. Comisión Reguladora de Energía. “RESOLUCIÓN Núm. RES/004/2015”.
32. PV Magazine “La segunda mayor central solar de México inaugurada en Durango” publicación 30/05/14. Obtenida en Julio 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/la-segunda-mayor-central-solar-de-mxico-inaugurada-en-durango\\_100015481/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/la-segunda-mayor-central-solar-de-mxico-inaugurada-en-durango_100015481/).
33. PV Magazine “La mexicana CFE sostiene que la reforma energética favorecerá a las renovables” publicación 28/04/14. Obtenida en Julio 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/la-mexicana-cfe-sostiene-que-la-reforma-energetica-favorecer-a-las-renovables\\_100015099/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/la-mexicana-cfe-sostiene-que-la-reforma-energetica-favorecer-a-las-renovables_100015099/).
34. Instituto de Investigaciones Eléctricas, GEF (Global Environment Facility). “Parque Solar Bicentenario Green Growth” 3er Coloquio Internacional Sistemas Fotovoltaicos.
35. RED SolLAC “Central Solar Fotovoltaica Piloto Santa Rosalia”. Obtenida en Julio 2015 de <http://redsollac.org/nuevo/mexico-1mw-central-solar-fotovoltaica-piloto-santa-rosalia-2/>.
36. Ley de Incentivos para el desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. Guatemala.
37. Proyecto ARECA. “Análisis del Mercado Guatemalteco de Energía Renovable” 2009.
38. BNAMERICAS “Planta Solar Fotovoltaica Horus I”. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/es/horus-i-solar-plant-horus-i>.
39. PV Magazine “Guatemala acoge una Central Solar de 5MW, La Mayor de Centroamerica” publicación 22/04/14. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/>

CENTRALES FOTVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

- guatemala-acoge-una-central-solar-de-5-mw--la-mayor-de-centroamerica\_100014972/.
40. Proyecto ARECA. “Análisis del Mercado Salvadoreño de Energía Renovable” 2010.
  41. Ley 462: Ley de Incentivos Fiscales para el Fomento de las Energías Renovables en la Generación de Electricidad. El Salvador.
  42. Acuerdo No 162 – E-2012: Normativa Técnica para Caracterizar los Proyectos que Aprovechan las Fuentes Renovables en la Generación de Energía Eléctrica.
  43. SMA. “Planta Fotovoltaica en Atacama en operación con tecnología SMA” Nota de Prensa. Junio 2014.
  44. SUNPOWER. “Total y SunPower celebran la apertura de la Planta Solar PV Salvador de 70 MW” Nota de Prensa. Enero 2015.
  45. Proyecto ARECA. “Análisis del Mercado Hondureño de Energía Renovable” 2009.
  46. Planta Solar Pavana. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.hondudiario.com/?q=node/17305>.
  47. Planta Solar Marcovia. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/es/marcovia-solar-plant-marcovia>.
  48. PV Magazine “Honduras: Corporación Aura construye central de 61 MW” publicación 16/12/14. Obtenida en Octubre 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--corporacin-aura-solar-construye-central-de-61-mw\\_100017676/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--corporacin-aura-solar-construye-central-de-61-mw_100017676/).
  49. PV Magazine “Honduras: La Noruega Scatec asegura Financiación para central solar de 60 MW” publicación 30/12/14. Obtenida en Octubre 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--la-noruega-scathec-asegura-financiacion-para-central-solar-de-60-mw\\_100017760/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--la-noruega-scathec-asegura-financiacion-para-central-solar-de-60-mw_100017760/).
  50. PV Magazine “Honduras: Canadian Solar suministra módulos para proyectos FV con 146 MW” publicación 15/10/14. Obtenida en Octubre 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--canadian-solar-suministra-mdulos-para-proyectos-fv-con-146-mw\\_100016907/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--canadian-solar-suministra-mdulos-para-proyectos-fv-con-146-mw_100016907/).
  51. SOPOSA-COHESSA. Obtenida en Octubre 2015 de <http://soposa.com/>
  52. PV Magazine “Honduras: Central solar 70 MW entrara en servicio antes del 1 de agosto” publicación 23/07/15. Obtenida en Octubre 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--central-solar-de-70-mw-entrar-en-servicio-antes-del-1-de-agosto\\_100019956/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/honduras--central-solar-de-70-mw-entrar-en-servicio-antes-del-1-de-agosto_100019956/).
  53. La Gaceta, República de Honduras Decreto 267-98. Obtenida en Octubre 2015 de <https://docs.google.com/viewer?url=http://faolex.fao.org/docs/pdf/hon92280.pdf>.
  54. La Gaceta, República de Honduras, Decreto 70-2007. Obtenida en Octubre 2015 de <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.poderjudicial.gob.hn/juris/Leyes/Ley%20de%20Promocion%20a%20la%20Generacion%20de%20Energia%20Electrica%20con%20Recursos%20Renovables.pdf>.
  55. La Gaceta, República de Honduras, Decreto 404-2014. Obtenida en Octubre 2015 de <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.enee.hn/noticias/Ley%20General%20de%20la%20Industria%20Electrica%20Honduras%20-%20-%20Decreto%20404-2014.pdf>.
  56. Proyecto ARECA (2010). “Análisis del Mercado Nicaragüense de Energía Renovable”.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

57. IRENA (2015). “Nicaragua: EVALUACIÓN DEL ESTADO DE PREPARACION DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES” Enero 2015.
58. Ley 532 “Para La Promoción De Generación Eléctrica Con Fuentes Renovables”. Nicaragua.
59. REVE “Nicaragua Inaugura central de energía Fotovoltaica de 1,38 MW”, publicación 22/02/13. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.evwind.com/2013/02/22/nicaragua-inaugura-central-de-energia/-solar-fotovoltaica-de-138-mw/>.
60. ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) (2014). Plan de Expansión de la Generación Eléctrica periodo 2014-2035.
61. José María Blanco (2013). BID (Banco Interamericano de Desarrollo). “Sustainable Energy for all, Evaluación Rápida y Análisis de Vacíos Costa Rica” Marzo 2013.
62. Ley 7200 “Generación Eléctrica Paralela O Autónoma”. Costa Rica.
63. ARESERP: “ARESEP propone tarifas para promover la generación solar”, Obtenida en Octubre 2015 de <http://aresep.go.cr/usuarios/noticias/1168-aresep-propone-tarifas-para-promover-la-generacion-solar>.
64. SmartGrid Costa Rica “Arranca Parque Solar Miravalles Y Proyecto Solar Ice Sabana” Publicación 22/11/12. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.smartgridcostarica.com/2012/11/21/arranca-parque/-solar-miravalles-y-proyecto-solar-ice-sabana/>.
65. Ing. Roberto Matheus (2010). “Descripción del Sector Eléctrico de Panamá” Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Agosto 2010.
66. Proyecto ARECA (2010). “Análisis del Mercado Panameño de Energía Renovable”.
67. ETESA (2014). Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2014-2028.
68. La Ley 37 “Establece El Régimen De Incentivos Para El Fomento De La Construcción, Operación Y Mantenimiento De Centrales Y/O Instalaciones Solares”. Panamá.
69. Ing. Fernando Díaz. Director de Electricidad. Secretaria Nacional de Energía. xtenda. “Jornada online Canal Renovables Centroamérica”. Mayo 2015.
70. Fabio Klitenik, Pablo Mira, Pablo Moldovan(2009). “El Mercado Eléctrico Argentino” Ministerio de Economía y Finanzas Publicas. Cuarto Trimestre 2009.
71. CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) (2015). “Síntesis del Mercado eléctrico Mayorista de la República Argentina” Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Marzo 2015.
72. Santiago Garrido (2013). “Energías renovables y dinámicas de desarrollo en Argentina: Políticas de universalización del acceso y diversificación de la matriz energética.” Conferencia Internacional LALICS, Rio de Janeiro, Brasil. Noviembre 2013.
73. Ley 26.190 “Régimen De Fomento Nacional Para El Uso De Fuentes Renovables De Energía Destinada A La Producción De Energía Eléctrica”. Argentina.
74. PV Magazine “Argentina: Mendoza acogerá central solar de 1 MW” publicación 22/04/15. Obtenida en Julio 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/argentina--mendoza-acoger-central-solar-de-1-mw\\_100018969/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/argentina--mendoza-acoger-central-solar-de-1-mw_100018969/).
75. D.H. Pontoriero, Marcelo Gustavo Molina (2009). “Evaluación Técnica Y Económica De Generación Híbrida Solar-Eólica En La Provincia De San Juan – Argentina” Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano De Cigré Argentina. Mayo 2009.

CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

76. RED SolLAC “Argentina, 5 MW, Parque Solar Cañada Honda”. Obtenida en Julio 2015 de <http://redsollac.org/nuevo/argentina/-5mw-parque-solar-canada-honda/>.
77. PV Magazine “Argentina: Se inaugura el primer parque FV de la Provincia de San Luis” publicación 21/10/14. Obtenida en Julio 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/argentina--se-inaugura-el-primer-parque-fv-de-la-provincia-de-san-luis\\_100016975/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/argentina--se-inaugura-el-primer-parque-fv-de-la-provincia-de-san-luis_100016975/).
78. IRENA (2014). PERU EVALUACION DEL ESTADO PREPARACION DE LAS ENERGIAS RENOVABLES 2014.
79. Decreto Legislativo 1002 Promoción de Generación con uso de Energías Renovables. Perú. Disponible en [https://docs.google.com/viewer?url=http://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL\\_de\\_promocion\\_de\\_la\\_inversion\\_para\\_la\\_generacion\\_de\\_electricidad\\_con\\_el\\_uso\\_de\\_energias\\_renovables\\_1002.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=http://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL_de_promocion_de_la_inversion_para_la_generacion_de_electricidad_con_el_uso_de_energias_renovables_1002.pdf).
80. Decreto Supremo 050-2008-EM. Perú. Obtenida en Octubre 2015 de <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.coes.org.pe/dataweb3/2010/djr/baselegal/Aprueban\%20Reglamento\%20de\%20la\%20Generacion\%20de\%20Electricidad\%20con\%20Energias\%20Renovables.pdf>.
81. Norma Técnica Peruana. NTP 399.403.2006.
82. Panamerica Solar. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.gestampsolar.com/es/negocio/proyectos-de-investigacion/panamericana-solar>.
83. Tacna Solar. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.gestampsolar.com/es/negocio/proyectos-de-investigacion/tacna-solar-0>
84. Majes solar. Obtenida en Marzo 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/es/majes-solar-20-t-solar-plant-majes-solar-20-t>.
85. Planta Solar Arepa. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/arepa-solar-plant-arepa>
86. Planta Solar La Joya. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/la-joya-solar-plant-la-joya>
87. Central Solar Pampa Colorada. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/pampa-colrada-solar-plant-pampa-colorada>
88. Central Solar Pampa Las Pulgas. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/pampa-las-pulgas-pampa-las-pulgas>
89. Central Solar Pampa Siguas. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/pampa-siguas-solar-plant-pampa-siguas>
90. Central Solar Tesoro. Obtenida en Agosto 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/energiaelectrica/tesoro-solar-plant-tesoro>
91. CONELEC (2011). Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Folleto Multianual 2011.
92. Paula García Zaragoza (2011). “El Mercado de las Energías Renovables en Ecuador”. ICEX (Instituto Español de Comercio Exterior).
93. Planta Solar Fotovoltaica Santa Elena. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.bnamericas.com/project-profile/es/santa-elena/-photovoltaic-plant-santa-elena>.
94. Aguilar, C.; Galarza, L.; Recalde, A (2015). “Mejoramiento de la Calidad del Producto Técnico e Impacto en la Utilización de Generación Distribuida con

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

- Energías Renovables en una Zona de la provincia de Manabí”. Revista Técnica Energía. Enero 2015, Issue 11, p92-100. 9p.
95. Ing. Damián Lara Salazar. Gran Solar (2013). “Ficha Ambiental para la Línea de Transmisión a 13.8Kv Asociada al Proyecto Fotovoltaico Salinas”. Octubre 2013.
  96. Dr. Ing. Gonzalo Casaravilla (2011). “Infraestructura Energética del Sector Eléctrico 2010-2020.” Revista Técnica Ingeniería. Diciembre 2011. P26-31.
  97. Diego Velázquez Terranova (2012). “El Mercado de las Energías Renovables en Ecuador”. ICEX (Instituto Español de Comercio Exterior). Mayo 2012.
  98. Uruguay XXI Promoción de Inversiones y Exportaciones (2014). “Energías Renovables: Oportunidad de Inversión” Agosto 2014.
  99. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Montevideo. ICEX (2012). “El Sector de las Energías Renovables en Uruguay”. Mayo 2012.
  100. Ley 16.906 de Promoción y Protección de Inversiones. Uruguay.
  101. BID. “Proyecto Energía Solar La Jacinta”. Obtenida en Julio 2015 de <http://www.iadb.org/es/proyectos/project-information-page,1303.html?id=UR-L1092>.
  102. Ley N.º 1604 de Electricidad de 1994. Disponible en <https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fwww2.hidrocarburos.gob.bo%2Fphocadownload%2FLey%2520de%2520Electricidad.pdf>
  103. BID (2013). Evaluación Financiera Y Económica Del Proyecto Eterificación Rural Con Energía Renovable (BO-X1013). Julio 2013.
  104. PV Magazine “Bolivia abre licitación del proyecto solar de 5 MW en Pando” publicación 19/03/14. Obtenida en Octubre 2015 de [http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/bolivia-abre-la-licitacin-del-proyecto-solar-de-5-mw-en-pando\\_100014555/](http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/bolivia-abre-la-licitacin-del-proyecto-solar-de-5-mw-en-pando_100014555/)
  105. Administración Nacional de Electricidad “ANDE”. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.ande.gov.py/>
  106. OLADE (2003). La Situación Energética en América Latina Informe Final. Marzo 2003.
  107. Ley 3009 de la Producción y Transporte Independiente de Energía Eléctrica. Disponible en <https://docs.google.com/viewer?url=http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/leyes/Ley%203009%20PTIEE.pdf>.
  108. Desarrollo de las Energías Renovables en Venezuela. Obtenida en Agosto 2015 de <http://latinoamericarenovable.com/2013/06/29/el-desarrollo-de-las-energias-renovables-en-venezuela-reto-o-utopia/>.
  109. FUNDELEC (2007). “La Luz del Alba: Energías Renovables por un Futuro Mejor”. Edición: Enero- Marzo 2007.
  110. Empresa de nacional de electricidad sociedad anónima chile. Habilitado: <http://www.endesa.cl/es/Paginas/home.aspx>
  111. Sistema interconectado del norte grande. Obtenida en Octubre 2015 de [http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03\\_Energias/Otros\\_Niveles/Electricidad/Sistema\\_Electrico/sing.html](http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/Electricidad/Sistema_Electrico/sing.html)
  112. Sistema interconectado central. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.cdecsic.cl/sobre-cdec-sic/sic/>
  113. Diario oficial de la república de Chile. Obtenida en Septiembre 2015 de [https://docs.google.com/viewer?url=http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/08\\_Normativas/02\\_energias/descargable\\_renovables/2008\\_ResEx1278\\_ERNC.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/08_Normativas/02_energias/descargable_renovables/2008_ResEx1278_ERNC.pdf)
  114. Ley 20257 Ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.

CENTRALES FOTOVOLTAICAS: CONTEXTO COLOMBIANO

115. Proyecto solar RAVSOE. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/planta-solar-fotovoltaica-ravsoe-ravsoe?idioma=en>
116. Proyecto solar Pampa solar norte PV. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/pampa-solar-norte-pv-solar-project-pampa-solar-norte?idioma=en>
117. Proyecto el Tamarugo Dólar Granja. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/parque-solar-el-tamarugo-el-tamarugo?idioma=en>
118. Proyecto El Chañar Solar. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/parque-solar-el-chanar-el-chanar?idioma=en>
119. Proyecto Fotovoltaico Laberinto Solar. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/bolero-oeste-solar-photovoltaic-project/-ex-laberinto-bolero-oeste-ex-laberinto?idioma=en>
120. Proyecto solar Sol del Loa. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/sol-del-loa-solar-plant-sol-del-loa?idioma=en>
121. Proyecto solar Chaka PV Planta solar. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/chaka-pv-solar-plant-chaka?idioma=en>
122. Complejo solar FV Pica. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/fv-pica-solar-complex-complejo-solar-fv-pica?idioma=en>
123. Huerta solar Fotovoltaica Planta. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/huerta-solar-photovoltaic-plant-huerta-solar-fotovoltaica?idioma=en>
124. Proyecto fotovoltaico Maria Elena. Obtenida en Octubre 2015 de <http://www.bnamericas.com/en/project-profile/electricpower/parque-fotovoltaico-maria-elena-fotovoltaico-maria-elena?idioma=en>
125. Planta solar Amanecer. Obtenida en Octubre 2015 de [http://berc.berkeley.edu/atacama-the-sun-of-chilean-energy/?utm\\_source=BERC+Master+List&utm\\_campaign=3ec5c53ad2-Weekly\\_BERC\\_1\\_Sep\\_269\\_26\\_2011&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_6307259a70-3ec5c53ad2-277409841](http://berc.berkeley.edu/atacama-the-sun-of-chilean-energy/?utm_source=BERC+Master+List&utm_campaign=3ec5c53ad2-Weekly_BERC_1_Sep_269_26_2011&utm_medium=email&utm_term=0_6307259a70-3ec5c53ad2-277409841)
126. Ley 1715 de 2014 “Por Medio De La Cual Se Regula La Integración De Las Energías Renovables No Convencionales Al Sistema Energético Nacional”.
127. Ministerio de Minas. Grupo de Participación y Servicio al ciudadano: Informe Documento en Discusión: Proyecto de Decreto “Por el cual se establecen los lineamientos de política en materia de la aplicación de los incentivos a la inversión en proyectos de fuentes no convencionales de energía y gestión eficiente de la energía contemplados en el Capítulo III de la Ley 1715 de 2014.” (Abril 2015). Obtenida en Octubre 2015 de <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/1186017/InformeFuentesNoConvencionalesweb.pdf/5854942b-fc40-4457-8a09-1ab0928ab80c>







# Una nota sobre la transformada de Fourier en espacios de Hölder

## A note on the Fourier transform in Hölder spaces

Duván Cardona Sánchez \*

Department of Mathematics, Universidad del Valle, Cali - Colombia.

FECHA DE ENTREGA: 14 DE ENERO DE 2016  
 FECHA DE EVALUACIÓN: 15 DE FEBRERO DE 2016  
 FECHA DE APROBACIÓN: 7 DE MARZO DE 2016

**Abstract.** In this note we study the boundedness of the periodic Fourier transform from Lebesgue spaces into Hölder spaces. In particular, we generalize a classical result by Bernstein, [1]. **MSC 2010.** Primary 42A24, Secondary 42A16.

**Resumen** En este artículo, se estudia la acotación de la transformada periódica de Fourier desde espacios de Lebesgue a Espacios Hölder. Particularmente, se generaliza un resultado clásico de Bernstein.

**Keywords:** Hölder spaces, Fourier transform, Bernstein’s theorem, Fourier series

**Palabras Clave:** espacios de Hölder, transformada de Fourier, espacios de Lebesgue

### 1. Introduction

Let us consider the periodic Fourier transform acting on measurable functions  $f : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{C}$  by

$$(\mathcal{F}f)(n) := \hat{f}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} f(\theta) d\theta, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (1)$$

where  $\mathbb{T} = [0, 2\pi)$  is the one-dimensional torus. As it is well known, if  $f \in L^2(\mathbb{T})$ , then  $\mathcal{F}f \in L^2(\mathbb{Z})$  and  $\|f\|_{L^2(\mathbb{T})} = \|\mathcal{F}f\|_{L^2(\mathbb{Z})}$ . A generalization of this fact is the Hausdorff-Young inequality: if  $f \in L^p(\mathbb{T})$ ,  $1 < p \leq 2$  then

$$\|\mathcal{F}f\|_{L^{p'}(\mathbb{Z})} \leq \|f\|_{L^p(\mathbb{T})}, \quad 1/p + 1/p' = 1. \quad (2)$$

Here, the periodic Hölder spaces are the Banach spaces defined for each  $0 < s \leq 1$  by

$$A^s(\mathbb{T}) = \{f : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{C} : |f|_{A^s} = \sup_{x, h \in \mathbb{T}} |f(x+h) - f(x)| |h|^{-s} < \infty\}$$

\* [duvanc306@gmail.com](mailto:duvanc306@gmail.com), [d.cardona.math@gmail.com](mailto:d.cardona.math@gmail.com)

together with the norm  $\|f\|_{A^s} = |f|_{A^s} + \sup_{x \in \mathbb{T}} |f(x)|$ . The main problem here is to determine which properties of  $f$  guarantees the  $p$ -summability of its periodic Fourier transform. In this topic, chronologically one should apparently start with the celebrated paper by S.N. Bernstein of 1914 [1] where he shows that if  $f \in A^s(\mathbb{T})$ ,  $1/2 < s < 1$ , then  $\mathcal{F}f \in L^1(\mathbb{Z})$ . The Bernstein theorem is sharp: there exist functions in  $A^{1/2}(\mathbb{T})$  whose Fourier transform does not converge absolutely. A classical example is the Hardy-Littlewood series

$$f(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{in \log n} e^{in\theta} / n. \tag{3}$$

For  $1 < p \leq \infty$  the inclusion map  $i : L^1(\mathbb{Z}) \rightarrow L^p(\mathbb{Z})$  is continuous. Hence, by the Bernstein theorem, the Fourier transform is a bounded operator from  $A^s(\mathbb{T})$  into  $L^p(\mathbb{T})$  for all  $1 < p \leq \infty$  and  $\frac{1}{2} < s \leq 1$ . Bernstein’s theorem was generalized by O. Szász (see [9,10]) who proved that if  $f \in A^{s,r}$  then  $\mathcal{F}f \in L^p(\mathbb{Z})$ ,  $p \geq 1$ , where  $s > 1/r + 1/p - 1$  if  $1 < r \leq 2$  and  $s > 1/p - 1/2$  if  $r > 2$ . Szász also gave examples to show that the range of values of  $s$  could not be extended. The Bernstein theorem and the Szász results has been extended to other groups. On the other hand, is known the Zygmund’s result (see [5,19]) that the Hölder condition in Bernstein’s theorem can be relaxed if  $f$  is of bounded variation. Zygmund shows that, in this case with  $f$  of bounded variation, and  $f \in A^s(\mathbb{T})$ ,  $0 < s < 1$ ,  $\mathcal{F}f \in L^1(\mathbb{T})$ . By the example of  $f$  as in (3), the boundedness of the Fourier transform fails from  $A^s(\mathbb{T})$  into  $L^1(\mathbb{Z})$ . Other works regarding boundedness of the Fourier transform in Hölder spaces can be found in [11,12,13,14] and [15]. In this paper we obtain the following generalization of the Bernstein’s theorem.

**Theorem 1.** *Let  $2/3 < p \leq 2$  and let  $s_p = 1/p - 1/2$ . Then, the Fourier transform  $f \mapsto \mathcal{F}f$  from  $A^s(\mathbb{T})$  into  $L^p(\mathbb{T})$  is a bounded operator for all  $s, s_p < s < 1$ . In particular, if  $p = 1$  we obtain the Bernstein Theorem.*

We observe that the function  $p \mapsto s_p$  from  $(2/3, 2)$  into  $(0, 1)$  is bijective; with this in mind one can combine Szász’s results with our main theorem in order to give  $p$ -summability of the periodic Fourier transform on the interval  $(2/3, \infty)$ . However, we observe that for  $p \geq 2$ , the lower bound for  $s$  can be relaxed. We present this with more precision in the following remark.

*Remark 1.* Let  $0 < s \leq \frac{1}{2}$ . Then, the Fourier transform  $\mathcal{F} : A^s(\mathbb{T}) \rightarrow L^p(\mathbb{T})$ , is a bounded operator for  $2 \leq p < \infty$ , i.e, there exists a positive constant  $C > 0$  satisfying  $\|\mathcal{F}f\|_{L^p(\mathbb{Z})} \leq C\|f\|_{A^s(\mathbb{T})}$ .

This note is organized as follows. In Section 2 we present some preliminaries and the corresponding statement of the Bernstein’s theorem. In Section 3 we present the proof of our results, which we briefly discuss in the last section.

## 2. Preliminaries

In this section we introduce the necessary background in harmonic analysis used in the remainder of this paper. We first define the Fourier transform of certain

FOURIER TRANSFORM IN HÖLDER-SPACES

discrete functions. Let  $a \in L^2(\mathbb{T})$ . The Fourier transform  $\mathcal{F}(a) = \widehat{a}(\cdot)$  of  $a$  is the discrete function  $\mathbb{Z}$  defined by.

$$\widehat{a}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} a(\theta) d\theta. \tag{4}$$

The Fourier inversion formula for Fourier series gives

$$a(\theta) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} e^{in\theta} \widehat{a}(n). \tag{5}$$

The Plancherel formula for the Fourier periodic transformation gives

$$\sum_{m \in \mathbb{Z}} |\widehat{a}(m)|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |a(\theta)|^2 d\theta. \tag{6}$$

Our main goal is the extension of a classical result proved by Bernstein on the periodic Fourier transform in Hölder functions. Thus, the corresponding statement is:

**Theorem 2.** (*Bernstein*). *If  $f \in \Lambda^s(\mathbb{T})$ ,  $\frac{1}{2} < s \leq 1$  then  $\|\widehat{f}\|_{L^1(\mathbb{Z})} \leq C_s \|f\|_{\Lambda^s}$ , i.e, the periodic Fourier transform extends to a bounded operator from  $\Lambda^s(\mathbb{T})$  into  $L^1(\mathbb{Z})$ .*

Now, we are ready for the proof of our main results, i.e, Theorem 1 and Remark 1.

### 3. Proofs

**Proof of Theorem 1.** We begin by considering  $t, h \in \mathbb{T}$ , and  $f \in \Lambda^s(\mathbb{T})$  for some  $0 < s < 1$ . Fourier inversion formulae guarantees that

$$f(t - h) - f(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} (e^{-inh} - 1) \widehat{f}(n) e^{int}. \tag{7}$$

If take  $h = 2\pi/3 \cdot 2^m$  and  $2^m \leq n \leq 2^{m+1}$  we have

$$|e^{-inh} - 1| \geq \sqrt{3}. \tag{8}$$

By (8) and Plancherel formulae, we have

$$\begin{aligned} \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |\widehat{f}(n)|^2 &\leq \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |e^{-inh} - 1|^2 |\widehat{f}(n)|^2 \\ &= \|f(\cdot - h) - f(\cdot)\|_{L^2(\mathbb{T})}^2 \\ &\leq \|f(\cdot - h) - f(\cdot)\|_{L^\infty(\mathbb{T})}^2 \\ &\leq \left[ \frac{2\pi}{3 \cdot 2^m} \right]^{2s} \|f\|_{\Lambda^s(\mathbb{T})}^2. \end{aligned}$$

Now we consider the case of the boundedness of  $\mathcal{F}$  from  $A^s$  into  $L^p$  for  $2/3 < p < 2$ , and  $s_p < s < 1$ . Let  $\varepsilon > 0$  be such that  $p = 2 - \varepsilon$ . In this case,  $0 < \varepsilon < \frac{4}{3}$  and  $s_p = \frac{1}{2}\varepsilon(2 - \varepsilon)^{-1} < s < 1$ . If  $r = 2(2 - \varepsilon)^{-1}$  then  $r > 1$ . By Hölder inequality we have,

$$\begin{aligned} \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} &\leq \left( \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |\widehat{f}(n)|^{(2-\varepsilon)r} \right)^{\frac{1}{r}} \cdot \left( \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} 1 \right)^{\frac{1}{r'}} \\ &\leq \left( \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |\widehat{f}(n)|^2 \right)^{\frac{1}{r}} \cdot 2^{(m+1)/r'} \\ &\leq [2\pi/3 \cdot 2^m]^{2s/r} \cdot 2^{(m+1)/r'} |f|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r} \\ &= [2\pi/3]^{2s/r} 2^{(m+1)/r' - 2ms/r} |f|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r}. \end{aligned}$$

First note that

$$\frac{m+1}{r'} - \frac{2ms}{r} = m\left(\frac{\varepsilon}{2} + s\varepsilon - 2s\right) + \frac{\varepsilon}{2}. \quad (9)$$

From the conditions  $0 < \varepsilon < 4/3$  and  $\frac{\varepsilon}{2}(2 - \varepsilon)^{-1} < s < 1$  we obtain the relation:  $\frac{\varepsilon}{2} + s\varepsilon - 2s < 0$ . Hence,

$$\begin{aligned} \sum_{n \geq 1} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{2^m \leq n < 2^{m+1}} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} \\ &\leq \sum_{m=0}^{\infty} 2^{m(\frac{\varepsilon}{2} + s\varepsilon - 2s)} \cdot 2^{\varepsilon/2} [2\pi/3]^{2s/r} |f|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r} \\ &\leq C |f|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r}. \end{aligned}$$

For  $n \leq -1$  we recall the formula  $\widehat{f}(-n) = \overline{\widehat{f}(n)}$ . So, we get,

$$\begin{aligned} \sum_{n \leq -1} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} &= \sum_{n \geq 1} |\widehat{f}(-n)|^{2-\varepsilon} \leq C |\overline{f}|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r} = C |f|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r} \\ &\leq C \|f\|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r}. \end{aligned}$$

Remembering that  $|\widehat{f}(0)| \leq \|f\|_{A^s(\mathbb{T})}$  we can write

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} \leq C' \|f\|_{A^s(\mathbb{T})}^{2/r}. \quad (10)$$

Hence,

$$\begin{aligned} \|\mathcal{F}f\|_{L^p(\mathbb{Z})} &= \left( \sum_{n \in \mathbb{Z}} |\widehat{f}(n)|^{2-\varepsilon} \right)^{(2-\varepsilon)^{-1}} \\ &\leq C^{(2-\varepsilon)^{-1}} \|f\|_{A^s(\mathbb{T})}^{\frac{2}{r}(2-\varepsilon)^{-1}} = C^{(2-\varepsilon)^{-1}} \|f\|_{A^s(\mathbb{T})}. \end{aligned}$$

FOURIER TRANSFORM IN HÖLDER-SPACES

Finally, we consider the boundedness of  $\mathcal{F}$  when  $p = 2$ . In this case for  $0 < s < 1$ , by the Plancherel formula, we get:

$$\|\mathcal{F}f\|_{L^2(\mathbb{Z})} \leq \|f\|_{L^2(\mathbb{T})} \leq C\|f\|_{A^s(\mathbb{T})}.$$

**Proof of Remark 1.** Let us consider  $1 < q \leq 2$  the corresponding conjugated exponent of  $p$ , i.e, the unique real number satisfying  $1/p + 1/q = 1$ . By the Hausdorff-Young inequality we have  $\|\widehat{f}\|_{L^p(\mathbb{T})} \leq \|f\|_{L^q(\mathbb{T})}$ . Moreover,

$$\begin{aligned} \|\widehat{f}\|_{L^p(\mathbb{T})} &\leq \|f\|_{L^q(\mathbb{T})} \\ &= \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(x)|^q dx\right)^{1/q} \\ &\leq \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(x) - f(0)|^q dx\right)^{1/q} + \frac{1}{2\pi}|f(0)| \\ &= \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{|f(x) - f(0)|^q}{|x - 0|^{qs}} |x|^{qs} dx\right)^{1/q} + \frac{1}{2\pi}|f(0)| \\ &\leq \sup_{x \in \mathbb{T}} \frac{|f(x) - f(0)|}{|x - 0|^s} \left(\int_0^{2\pi} x^{sq} dx\right)^{1/q} + \frac{1}{2\pi} \sup_{x \in \mathbb{T}} |f(x)| \\ &\leq C\|f\|_{A^s(\mathbb{T})}. \end{aligned}$$

#### 4. Discussion

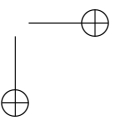
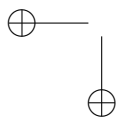
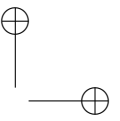
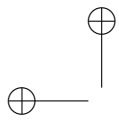
In this paper we generalize a classical theorem, published in 1914 by Bernstein. The Bernstein’s theorem gives a sufficient condition for the summability of the periodic Fourier transform of functions on the circle, by imposing certain regularity conditions on such functions. More precisely Bernstein’s theorem guarantees that regularity of order  $s \in (1/2, 1]$  is sufficient. Our Theorem 1 gives the  $p$ -summability of the Fourier transform,  $p \in (2/3, 1]$  by imposing regularity of order  $s \in (s_p, 1]$  where  $s_p = 1/p - 1/2$ . Particularly if  $p = 1$  we obtain the Bernstein’s theorem. Additionally, we note in Remark 1 that for the  $p$ - summability of the Fourier transformation,  $p \geq 2$ , we need  $s \in (0, 1)$ . It is possible extend this topic to the case of general compact Lie groups by using representation theory. This would be part of a future work. Recent works regarding the summability of the Fourier transform can be found in [3,4,6,7,17,18].

#### References

1. Bernstein, S. Sur la convergence absolue des séries trigonométriques. Comptes Rendum Hebdomadaires des Séances de l’Academie des Sciences, Paris, 158, 1661-1663, (1914).
2. Bloom, W. R. Bernstein’s inequality for locally compact Abelian groups. Journal the Australian mathematical society 17, 88-101, (1974).

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

3. Gát, G., Nagy, K. On the logarithmic summability of Fourier series. *Georgian Math. J.* 18 (2011)
4. Getsadze, R. On Cesáro summability of Fourier series with respect to double complete orthonormal systems. *J. Anal. Math.* 102, 209-223. (2007).
5. Katznelson, Y.: *An introduction to Harmonic Analysis.* Cambridge University Press (2004)
6. Khasanov, Y. K. On the absolute summability of Fourier series of almost periodic functions. Translation of *Ukrain. Mat. Zh.* 65 (2013), no. 12, 1716-1722. *Ukrainian Math. J.* 65 (12), 1904-1911. (2014).
7. Khasanov, Y. K. On absolute summability of Fourier series of almost periodic functions. (*Russian*) *Anal. Math.* 39, no. 4, 259-270. (2013)
8. Onnewer, C. W. Absolute convergence of Fourier series on certain groups. *Duke Mathematical Journal.* 39, 599-609, (1972)
9. Szász, O. Über den Konvergenzexponenten der Fouriersohen Reihen gewisser Funktionenklassen, *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Mathematisch-physikalische Klasse.* 135-150, (1922).
10. Szász, O. Über die Fourierschen gewisser Funktionenklassen. *Mathematische Annalen.* 530-536. (1928)
11. Szász, Otto Zur Konvergenztheorie der Fourierschen Reihen. (*German*) *Acta Math.* 61 (1933), no. 1, 185-201.
12. Szász, O. Fourier series and mean moduli of continuity, *Trans. American Math. Soc.*, 42, 366-395 (1937)
13. Titchmarsh, E. C. A note on the Fourier transform, *Journal of the London Mathematical Society.* 2, 148-150. (1963).
14. Ogata, N. On the absolute convergence of Lacunary Fourier Series. *Scientiae Mathematicae.* 2(3), 337-343 (1949).
15. Leinder, L. Comments on the absolute convergence of Fourier series. *Hokkaido Mathematical Journal.* 30, 221-230 (2001)
16. Li, L. Zhang, Y. The Cesáro summability of Fourier series on Hardy spaces. *J. Math. (Wuhan)* 27 (2007), no. 1, 1-9.
17. Weisz, F. Restricted summability of Fourier series and Hardy spaces. *Acta Sci. Math. (Szeged)* 75, no. 1-2, 197-217. (2009)
18. Young, W. H. On Classes of Summable Functions and their Fourier Series. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.* 87(594), 225-229, (1912).
19. Zygmund, A.: *Trigonometric series.* 2nd ed., Cambridge University Press (1959)









# Modelado de sensores basado en la Arquitectura MDA para microrredes eléctricas

## Sensor Modelling based on MDA Architecture for Electrical Microgrids

Elvis Eduardo Gaona García<sup>1\*</sup>, Cesar Leonardo Trujillo Rodríguez<sup>1\*\*</sup>, Víctor Daniel Angulo Morales<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

FECHA DE ENTREGA: 26 DE NOVIEMBRE DE 2015

FECHA DE EVALUACIÓN: 15 DE FEBRERO DE 2016

FECHA DE APROBACIÓN: 15 DE MARZO DE 2016

**Resumen** En este artículo se propone un modelo basado en la arquitectura MDA (*Model Driven Architecture*) para el diseño de una red de sensores inalámbricos que monitorea variables de tensión y corriente en una microrred eléctrica. Se describen sus componentes, el módulo sensor, el módulo de procesamiento, y por último el de transmisión de los datos. También se propone un modelo de toma de decisiones compuesto por una carga, la red principal y una fuente de generación con un sistema de almacenamiento de energía.

**Abstract** In this paper an approach based on MDA (Model Driven Architecture) architecture for design a wireless sensor network in order to monitoring variables of voltage and current in an electrical microgrid model is proposed. Their components are described, the sensor module, the processing module and finally the transmission of data. Also the model of decision making consists of a load, the principal grid and a generation source with an energy storage system is proposed.

**Palabras Clave:** redes de sensores inalámbricos, Arquitectura MDA, Microgrilla, sistemas de micro-almacenamiento.

**Keywords:** wireless sensor network, Model Driven Architecture, Microgrid.

\* egaona@udistrital.edu.co

\*\* cltrujillo@udistrital.edu.co

\*\*\* vdangulom@correo.udistrital.edu.co

## 1. Introducción

La Generación Distribuida (GD) es una de las alternativas tecnológicas que permite la generación de energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo [1]. Este tipo de generación pretende, con la integración de energías limpias y el uso de tecnologías versátiles en control y comunicaciones, mejorar el funcionamiento del modelo centralizado de red eléctrica a una red del futuro: inteligente, interactiva y amigable con el medio ambiente. De esta manera, la inclusión de microrredes eléctricas con fuentes renovables de energía como la eólica y la fotovoltaica, además del desarrollo de métodos eficientes de almacenamiento de energía, permiten solucionar las problemáticas de generación intermitente presentes en estas formas de generación distribuida [2].

La inteligencia en la toma de decisiones y la interactividad entre los elementos de una microrred eléctrica, requiere de una infraestructura de medición, recolección y transmisión de datos que lleve la información desde los diferentes nodos como lo son fuentes de generación y cargas, hasta un nodo central que realiza la gestión de los recursos en una microrred. Una red de sensores inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Network*) cumple con los requerimientos de flexibilidad y escalabilidad que este tipo de mediciones requiere, en particular se han utilizado en [3] con el propósito de monitorear el sistema de potencia en microrredes eléctricas.

Las redes de sensores presentan diferentes tipos de inconvenientes y restricciones por el *hardware*, y protocolos de comunicación que varía respecto al fabricante de los dispositivos, por lo tanto el *software* construido para este tipo de redes presenta características únicas e incompatibles con otros tipos de *software*, es así como el despliegue de este tipo de redes a través del modelo MDA (*Model Driven Architecture*) permite adaptar un estándar generalmente utilizado para desarrollo de sistemas distribuidos grandes, permitiendo que este tipo de redes se implementen transparentemente a sus tecnologías, fabricantes y otras variantes que actualmente presentan cada uno de los sensores, más aún presentar a los usuarios finales un sistema independiente de la plataforma centrado en componentes.

## 2. Generalidades

### 2.1. Concepto de microrred

La microrred comprende una parte del sistema de distribución eléctrica en media y baja tensión. Incluye una variedad de recursos energéticos distribuidos (DER) tales como generadores distribuidos y unidades de almacenamiento de energía, y diferentes tipos de usuarios finales (cargas eléctricas y/o térmicas), así como equipos de comunicación necesarios para la operación y el manejo de energía en tiempo real del sistema [2]. Esta sirve a una gran variedad de clientes, tales como, edificios de viviendas, entidades comerciales, parques industriales, zonas no interconectadas, etc. [4]; la microrred tiene la capacidad de importar y exportar energía de forma flexible desde y hacia la red, controlar el flujo de potencia activa y potencia reactiva, y gestionar manejar el almacenamiento de energía [5].

En los últimos años, una de las grandes prioridades a escala mundial es el desarrollo de fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, y en especial el aprovechamiento de fuentes renovables y energías limpias que produzcan una baja contaminación ambiental. Si bien los combustibles fósiles continuarán sufriendo una fracción apreciable del consumo energético, la oferta energética tenderá a ser más diversificada. Opciones como la energía, eólica, solar, biomasa renovable e hidrógeno juegan un papel importante en el largo plazo y producirán cambios substanciales en el perfil tecnológico ambiental y organizacional del sistema energético global [6].

## 2.2. Tipos de microrredes

La clasificación de una microrred eléctrica depende de factores tales como: el tipo de generación empleado, de las cargas a alimentar y la disposición física de la microrred, entre otras. Sin embargo, la clasificación más simple se puede dar en términos de la forma de onda de la señal de tensión generada, es decir, si la microrred eléctrica es en corriente directa (DC) o en corriente alterna (AC).

En [7], [8], y [9] se plantea el uso de microrredes eléctricas basadas en corriente directa. En este tipo de configuración los diferentes sistemas de generación se conectan a través de convertidores a un bus (nodo o barra) DC donde también se conectan las cargas y los sistemas de almacenamiento. En el caso de requerir la conexión de cargas AC, se tiene un inversor que asegura las condiciones de calidad de energía adecuadas. En la Figura 1 se muestra una microrred en DC.

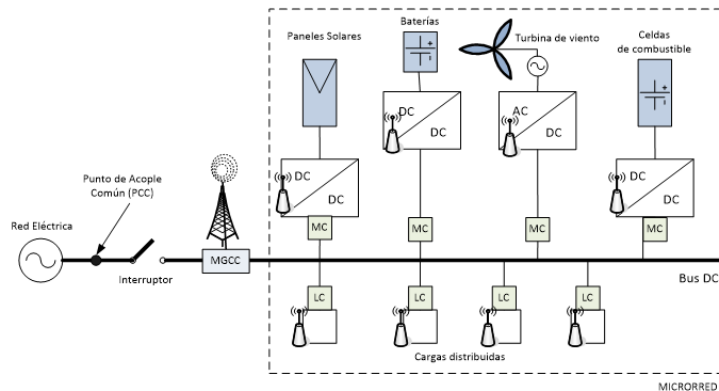


Figura 1. Microrred en DC.

Una clasificación adicional que se le puede dar a las microrredes en DC depende del nivel de tensión con el que se trabaje. De esta manera es posible trabajar con tensiones producto de la rectificación de sistemas AC monofásicos

o trifásicos, o trabajar con tensiones DC típicas, como por ejemplo, los 48 V utilizados en muchos esquemas y trabajos [9]. Generalmente este nivel de tensión es usado por razones de seguridad para el usuario.

Por otra parte, en las microrredes de corriente alterna los sistemas de generación y las cargas conectadas se conectan a través de convertidores a un bus AC. Los sistemas de almacenamiento y las cargas en DC requieren de convertidores que adecúan la energía del bus AC a sus características particulares. Adicionalmente, el bus se conecta en un único punto a la red eléctrica. En la Figura 2 se muestra la configuración de una microrred en AC.

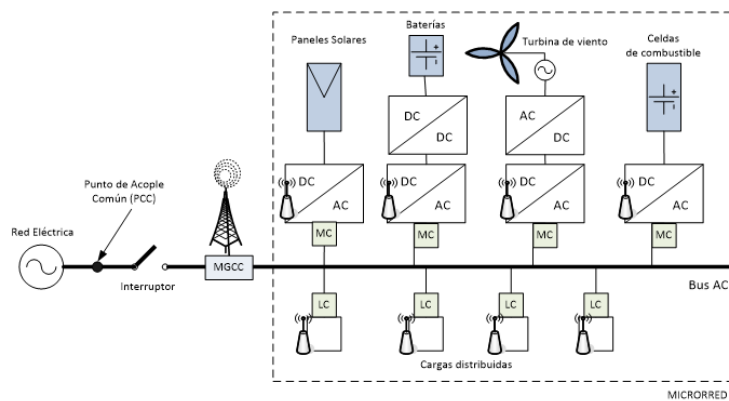


Figura 2. Microrred en AC.

Dentro de las microrredes en AC se presentan diversas posibilidades de clasificación en función del nivel de tensión a la que se opere, así como al tipo de sistema (monofásico o trifásico). Aunque es común encontrar muchos estudios de sistemas en baja tensión [10], también es posible encontrar aplicaciones de microrredes a nivel de media tensión [11].

### 3. Modelo MDA

En los sistemas distribuidos actuales, se han enfocado en la búsqueda de soluciones abiertas y reusables, donde sus componentes *hardware* y *software* sean creados independientes por muchos fabricantes, y que su uso e interoperabilidad sea garantizada, con fácil configuración e implementación, para llegar a esto se han tomado el modelo MDA [12], que define tres puntos de vista del sistema, que buscan abstraer una realidad compleja a una serie de modelos más sencillos. El primero punto de vista es CIM [13] (*Computing Independent Metamodel*), es un punto de vista independiente de la computación, el segundo punto de vista

es PIM [14] (*Platform Independent Metamodel*), punto de vista independiente de la plataforma y el tercero es PSM (*Platform Specific Metamodel*), este es el específico de la plataforma.

Al tomar cada uno de los puntos de vista se tiene toda una metodología para sistemas distribuidos, el CIM busca los requerimientos del problema, y el vocabulario único del sistema, de hecho este modelo CIM son plasmados por expertos del dominio. El PIM busca describir el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional pero sin que los conceptos que se usen, sean únicos de una plataforma concreta. Es decir que son válidos si el modelo es aplicado a todas las plataformas que se manejaran dentro del sistema. Y por último el PSM, este modelo busca describir el sistema mezclando el modelo PIM con detalles de la plataforma, es decir que si para un sistema intervienen un número  $n$  de plataformas únicas, se podrán generar  $n$  modelos PIM y cada uno de ellos es válido para una plataforma solamente.

Aunque MDA define tres tipos de modelos según su abstracción, no es una clasificación obligatoria, se pueden tener una gran cantidad de modelos, esto se ve en la posibilidad de tener en el modelo PIM distintos niveles de abstracción, al igual que en el modelo PSM, al variar las plataformas y las tecnologías únicas en que intervienen y campos de acción tan diferentes, se pueden generar distintos niveles y modelos. También introduce un modo de transformación para cambiar entre modelos, hasta llegar a transformarse en código, este tipo de transformaciones idealmente deben automatizarse y ejecutarse por herramientas. De esta forma al obtener una transformación automática entre dos niveles de abstracción, se requiere definir un conjunto de reglas, que describan como un modelo en un lenguaje específico puede transformarse en un modelo en el lenguaje destino. Este conjunto de reglas describen como una construcción en el lenguaje origen pueden transformarse en construcciones de un lenguaje destino.

#### 4. Red de sensores inalámbricos en microrredes eléctricas

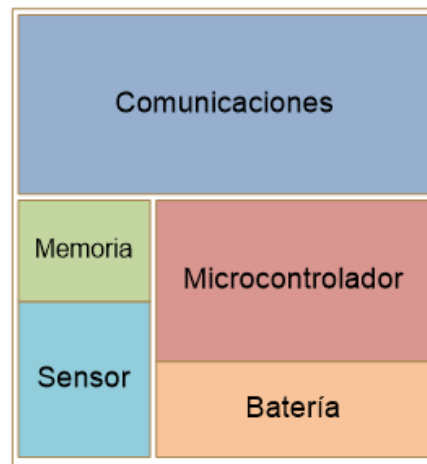
Una de red de sensores es una infraestructura comprendida por elementos de medida, computación y comunicación que proveen a un administrador la capacidad de observar y reaccionar a eventos y fenómenos que pueden ocurrir dentro de un ambiente específico [15]. Su componente principal puede definirse como un conjunto de dispositivos autónomos llamados Nodos sensores, los cuales se encuentran equipados con pequeñas interfaces de comunicación generalmente inalámbrica y adicionalmente con herramientas que le permiten realizar mediciones de distintos parámetros, tales como la humedad, la temperatura y la luz. Estos Nodos vienen equipados con pequeños microprocesadores y se alimentan generalmente mediante baterías, lo que hace imprescindible utilizar elementos que prioricen el ahorro de energía.

La red de sensores inalámbricos tiene como objetivo la colaboración entre sí de pequeños nodos [15], con el propósito de realizar mediciones en tiempo real de diversas variables. Este concepto es relativamente nuevo, sin embargo, sus aplicaciones se han dado en campos como la domótica, entornos militares, detección

ambiental . A continuación se muestran las características más importantes que deben cumplir una red de sensores dentro del modelo de una red inteligente de energía eléctrica:

- **Eficiencia:** el bajo consumo energético del nodo sensor es un punto importante, debido a que se ubican en locaciones donde no se disponen de sistemas fijos de alimentación.
- **Escalabilidad:** debido al despliegue progresivo de la red, es necesario mantener las condiciones de la red al aumentar la cantidad de nodos.
- **Tiempo real y comunicación:** Los datos deben entregarse dentro de un intervalo de tiempo considerable dependiendo la aplicación, para este propósito generalmente se usa protocolos como Zigbee.

Los nodos sensores, tienen una capacidad limitada de cómputo y comunicación, debido a esto su tiempo de vida es directamente proporcional a la fuente de alimentación o batería. Estos nodos llamados en la literatura como mote [16] (motas), por su tamaño y ligereza; al disponer de un sistema de procesamiento, son capaces de pre-procesar la información y transmitirla inalámbricamente hacia otro destino o hacia otra mota. Las partes de un nodo sensor se puede observar en la figura 3.



**Figura 3.** Componentes de un nodo sensor.

## 5. Arquitectura MDA sobre la red de sensores inalámbricos

La arquitectura MDA (*Model Driven Architecture*) dentro de las plataformas de las WSN (*Wireless Sensor Network*) dispone de múltiples protocolos, plataformas y campos únicos. El objetivo que se persigue es que estos puedan coexistir mediante una representación basada en modelos, y puedan transformarse en modelos con un nivel de abstracción menor, para lograrlo se plantean los siguientes requerimientos de la arquitectura en particular para una red de sensores [17].

- Abstracción: debe ser de un alto nivel, los desarrolladores no deben estar pendientes de los detalles del nodo o mota, como lo son *hardware* y *software*.
- Desarrollo basado en componentes: se debe permitir la reutilización del código y compatibilidad entre distintos componentes.
- Transformación a nivel de programación o lenguaje de maquina: un modelo inicial con un alto nivel de abstracción debe permitir su transformación a través de otros modelos hasta tener el modelo de código para el sensor o nodo.
- Limitaciones de *Hardware*: debe ser fácilmente escalable y compatible con los protocolos y *hardware* específico de desarrollo.

El modelo que se plantea en MDA, como transformación PIM se puede observar en la figura 4.

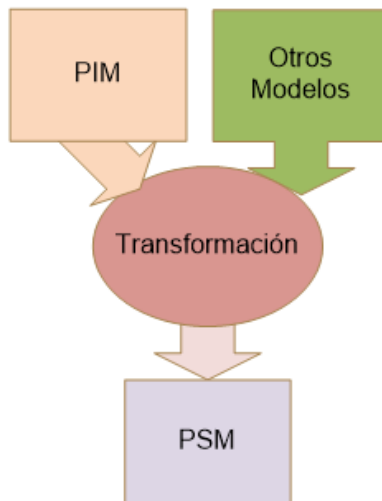
La arquitectura se centra en capturas y comunicación entre los nodos, para esto el modelo PIM describe el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional. Los conceptos de MDA se definen centrados en la existencia o planteamiento de un sistema [18], que puede contener un simple sistema informático, combinaciones de componentes en diferentes sistemas informáticos, o diferentes sistemas en diferentes organizaciones.

Adicionalmente, la arquitectura MDA determina los tipos de modelos que deben usarse, como preparar dichos modelos y las relaciones que existen entre los diferentes modelos. La transformación de modelos es el proceso de convertir un modelo en otro modelo del mismo sistema.

La Figura 5 muestra la transformación del modelo independiente de la plataforma (PIM) en un modelo específico PSM para una plataforma mediante el uso de información añadida que permita trazar ambos modelos, a esto se le conocen como mapas de transformación, donde se especifican las reglas de un PIM a un PSM para cada plataforma en concreto. Estos mapas incluyen los metamodelos y sus reglas haciendo uso del lenguaje computacional de específico [19].

## 6. Arquitectura MDA en una microrred eléctrica

La arquitectura MDA define tres puntos de vista del sistema, que buscan abstraer una realidad compleja a una serie de modelos más sencillos. El primero punto de vista es el independiente de la computación CIM (*Computing Independent Metamodel*), el segundo punto de vista es independiente de la plataforma PIM



**Figura 4.** Transformación entre modelos PIM-PSM.

y el tercero el específico de la plataforma PSM [20]. La arquitectura va a estar centrada en la captura y comunicación de los sensores que están conectados a una microrred eléctrica [21], para esto solo se tomó el modelo PIM y el concepto definido por MDA de transformación entre modelos que permite describir el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional.

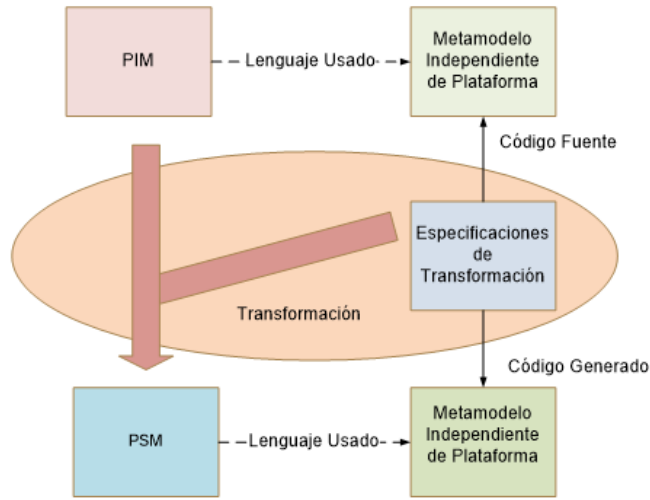
Para el caso de captura, el modelo se describe representando al nodo como un sistema, este nodo está conectado a los elementos que hacen parte de una microrred eléctrica, como fuentes de alimentación y cargas que tienen como objetivo la captura de datos con una entrada y una salida; la variable de entrada es el valor que se desea medir con el sensor voltaje o corriente. El nodo se describe con dos variables, tipo y valor, donde tipo toma el nombre físico de la variable medida y valor es el número que entra al nodo como se muestra en la figura 6.

Debido a que el nodo es capaz de hacer un pequeño pre-procesamiento, la salida del nodo tiene un dato unificado entre dos valores, que sin importar el tipo de nodo o valor que se mida, no va a variar entre nodos. Por otro lado, el segundo modelo PIM busca dar solución a la incompatibilidad de protocolos de comunicaciones, unificando los diferentes protocolos de comunicaciones de cada uno de los nodos, para este propósito se tiene un dispositivo de intercambio de protocolos transparente al usuario en la arquitectura de desarrollo de WSN, aunque también es posible plantear el modelo PIM de este método de transformación como se muestra en la figura 7.

En la figura 8 se muestra un tercer modelo PIM con un nivel de abstracción menor al anterior. Este modelo describe el siguiente nivel de abstracción que incluye las principales partes del nodo [22], sin que sean únicos de la plataformas

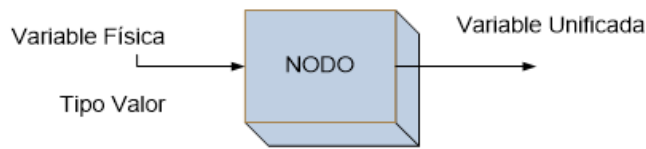


SENSORES ARQUITECTURA MDA



**Figura 5.** Especificaciones de transformación MDA.

de los nodos actuales. Se describen sus componentes, y cada uno de ellos se pueden comportar como un sistema que será separado de la plataforma específica, el primer módulo que describe el nodo es el sensor, encargado de capturar la variable física y transformarla en una señal eléctrica, esta señal entra directamente al módulo de procesamiento, capaz de pre-procesar y entregar la información al último módulo encargado de transmitir la información inalámbricamente.



**Figura 6.** Modelo PIM, de un sensor “Nodo”

El punto crítico en el modelamiento es la metodología de transformación entre los niveles, la arquitectura propuesta está basada en el nivel 1 de abstracción, las transformaciones son propias del desarrollo, lo que le permitiría a los diferentes usuarios finales de las redes solo tener las variables de entrada y salida de cada uno de los sensores y su interconexión con otros sensores, conformando toda una red unificada que captura de datos en una microrred eléctrica. Esto permitiría llegar

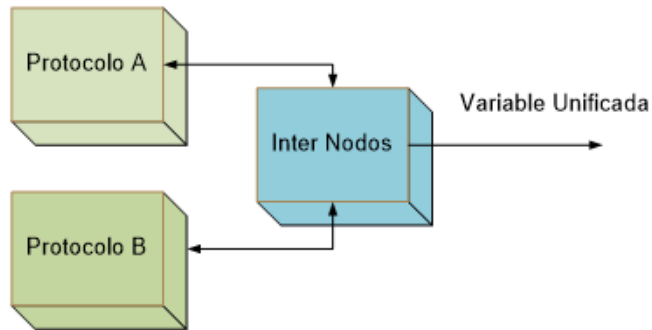


Figura 7. Modelo PIM, interconexión entre “nodos”.

a usuarios finales que no son expertos en desarrollo en este tipo de tecnologías emergentes, facilitando así la unión de componentes.

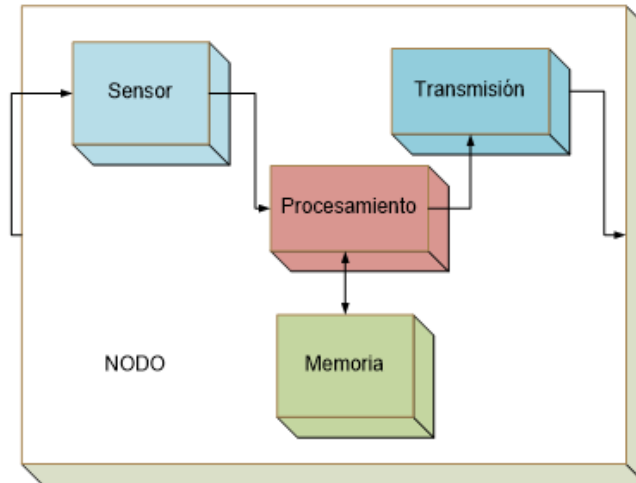


Figura 8. Modelo PIM, módulos de un “Nodo”.

### 6.1. Acercamiento a un modelo de toma de decisiones

Para la formulación del modelo de toma de decisiones se parte de un modelo sencillo mostrado en la figura 9, compuesto por una carga, la red principal y

SENSORES ARQUITECTURA MDA

una fuente de generación de energía, esta última cuenta adicionalmente con un sistema de almacenamiento. La carga es cualquier sistema cuyo propósito es el consumo energía eléctrica en una sola dirección y no tiene la capacidad de proveerla a la distribución principal; las fuentes de generación de energía contempladas son: paneles fotovoltaicos, fuente de biogás y generadores eólicos; adicionalmente el sistema de almacenamiento de energía y el regulador de la fuente de generación. Cada uno de estos componentes está siendo monitoreado por Sensor\_carga, Sensor\_Amacenaje y Sensor\_Fuente respectivamente.

El principal componente de este modelo unitario es el actuador mostrado en la figura 10, que une la sección de carga y la sección de alimentación, bien sea por distribución o red principal o por fuentes alternativas, diseñado para cuatro estados. Cada uno de sus estados permite que la microrred eléctrica maneje de forma adecuada las fuentes de energía, basada en las mediciones de los sensores de carga, sensor de almacenamiento de energía y sensor de la fuente alterna, no se contempla en el modelo la medición con sensores sobre la distribución principal y se tiene el criterio que esta distribución principal está en la capacidad de suministrar y recibir energía.

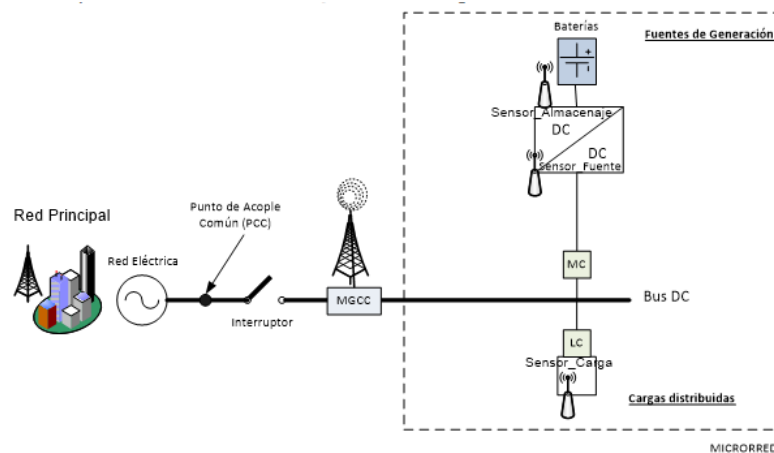
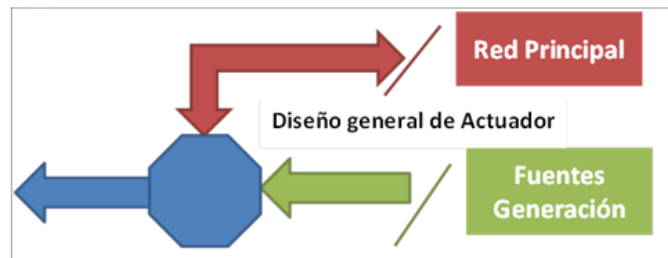


Figura 9. Modelo unitario de microrred eléctrica.

- A. Estado 1: Este estado se presenta en la Microrred eléctrica cuando existe una carga conectada y la fuente de generación está en la capacidad de suministrar energía a la red. El actuador desconecta la red principal y mantiene conectada la Fuente Alternativa y el almacenamiento de energía. Adicional a esto mantiene el estado hasta que se desconecte la carga.
- B. Estado 2: Este estado se presenta en la Microrred cuando existe una carga conectada y la fuente de generación no está en la capacidad de suministrar

- energía a la red. El actuador conecta la microrred a la red principal, desconectando la fuente de generación, adicionalmente el estado se mantiene hasta que se desconecte la carga.
- C. Estado 3: Este estado se presenta en la Microrred cuando no hay carga conectada a la microrred, adicionalmente la fuente de generación está en capacidad de suministrar energía a la red. El actuador conecta tanto la red principal como la fuente de generación. Este estado permite que la fuente de generación entregue energía hasta que se conecte la carga o no esté capacidad de suministrar energía.
  - D. Estado 4: Este estado se presenta en la Microrred cuando no hay carga conectada a la microrred, adicional a esto la fuente de generación no está en capacidad de suministrar energía a la red. El actuador desconecta la red principal, y la fuente de generación. Este estado permite que la fuente de generación entregue energía al sistema de almacenamiento (baterías) hasta que se conecte la carga o se cumplan los parámetros mínimos para suministrar energía a la red.

El modelo también contempla los sensores que deben estar presentes en una microrred eléctrica que interactúan con generadores eólicos, solares y con combustible biogás, la descripción de Sensores\_Fuentes se muestran en la figura 11, estos sensores están intrínsecamente relacionados con los actuadores locales del generador por lo que se especifican variables que son centralizadas en el modelo, la primera medida que toma el sensor es el estado de alarma o emergencia actual de la fuente de generación a la cual el sensor está monitoreando, esta medida se utiliza para alertar al control central si hay algún tipo de fallo dentro de la fuente de generación. La segunda medida del sensor es el estado de conexión hacia la microrred eléctrica, la tercera es la medición de los valores de corriente y voltaje actuales de la fuente de generación, si se presenta algún error en estos valores, el sensor transmite una alarma hacia la red de sensores conectado, por último en los sensores conectados a la fuente eólica y la fuente de biogás se contempla una retroalimentación de las revoluciones por minuto del generador para verificar su funcionamiento.



**Figura 10.** Modelo actuador de la microrred eléctrica.

SENSORES ARQUITECTURA MDA

Los sensores encargados de las cargas conectadas a la microrred se modelan como Sensores\_Carga y se muestran en la figura 12. Las tres medidas asociadas a este sensor son: Estado de emergencia, el estado de conexión de la carga a la microrred, y por último los niveles de voltaje y corriente; con este último ítem se mediría el consumo en periodos de tiempo finitos de cada una de las cargas presentes en la microrred y así lograr establecer acciones correctivas para su funcionamiento.

<b>Sensores_Fuentes</b>	<b>Tipo de Medida</b>	<b>Valores</b>
Biogás/Eólica	Estado_Alarma	A=Alarma N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V
	Parametro_RPM	rpm
Panel Solar	Estado_Alarma	A=Alarma N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V

Figura 11. Descripción Sensores\_Fuente.

Por último el sensor encargado de monitorear Sensor\_almacenamiento de energía se muestra en la figura 13. Los sistemas de almacenamiento tienen tres medidas, la primera medida se encarga de verificar si el sistema de almacenamiento de energía presenta alguna alarma o emergencia, la segunda medida es la verificación de conexión o desconexión a la microrred, y la tercera medición es el porcentaje de nivel de carga de la fuente de almacenamiento.

El algoritmo mostrado en la figura 14, inicia con la lectura de los sensores, para el caso específico del modelo unitario, se toman medidas de los tres sensores por cada componente de la Microrred, C\_Sensor que corresponde a sensor de la carga, A\_Sensor que corresponde al sensor de almacenamiento de energía y a F\_Sensor que corresponde a la fuente de generación.

La medición de los sensores es la base de cada iteración del modelo, estos valores evalúan si existe una carga conectada dentro de la microrred, para esto se utiliza el tipo de medida Estado\_Conexión. En el caso en el que no se cuente con

Sensores_Carga	Tipo de Medida	Valores
Carga	Estado_Emergencia	A=Emergencia N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V

Figura 12. Descripción Sensores\_Carga.

Sensores_Almacenamiento de energía	Tipo de Medida	Valores
Almacenamiento de energía	Estado_Emergencia	A=Emergencia N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_NivelCarga	Ca[%]=Porcentaje de Carga
	Data_Voltaje	V

Figura 13. Descripción Sensores\_Almacenamiento de energía.

una carga conectada, se verifica el estado de carga en porcentaje Data\_NivelCarga, basado en este estado se procede a indicarle al actuador en qué estado se debe posicionar, si el nivel de carga del almacenamiento de energía se encuentra por encima del 95 %, el actuador se ubica en el Estado 3, donde se va a suministrar energía a la red principal de la microrred, Si este valor está por debajo del 95 %, el actuador se posicionara en el estado 4, donde la fuente de generación se desconectara e iniciara la carga sobre el sistema de almacenamiento de energía.

El modelo también contempla cuando se encuentra una carga conectada en el sistema, para lo cual se verifica si el nivel de carga del almacenamiento de energía está por encima del 60 %, para este caso el actuador se posicionara en el Estado 1, donde el almacenamiento de energía y las fuentes de generación serán las que suministren energía a la carga, en caso contrario el sistema de almacenamiento de energía no cumple los requerimientos y la Red principal estará conectada a la microrred.

Este proceso se repite  $n$  cantidad de veces durante el tiempo en que los sensores monitoreen la Microrred, el modelo adicionalmente tiene un sistema de emergencia, en cada uno de sus componentes, esto permite que en cualquier momento del algoritmo se presente un incidente dentro de la red y se tome la acción correctiva, por ejemplo, si el sensor de la fuente eólica tiene en Estado\_Alarma

SENSORES ARQUITECTURA MDA

= Alarma, nunca se realice su conexión hasta que el estado cambie de valor a Normal, esto permite el aislamiento de los componentes y no afecten el correcto funcionamiento del sistema.

Partiendo del modelo unitario mostrado en la figura 15, el escalamiento de la estructura del modelo para  $n$  cargas y  $n$  fuentes alternas, siguen los mismos principios del modelo unitario, agregando actuadores por cada fuente de generación involucrada en la microrred.

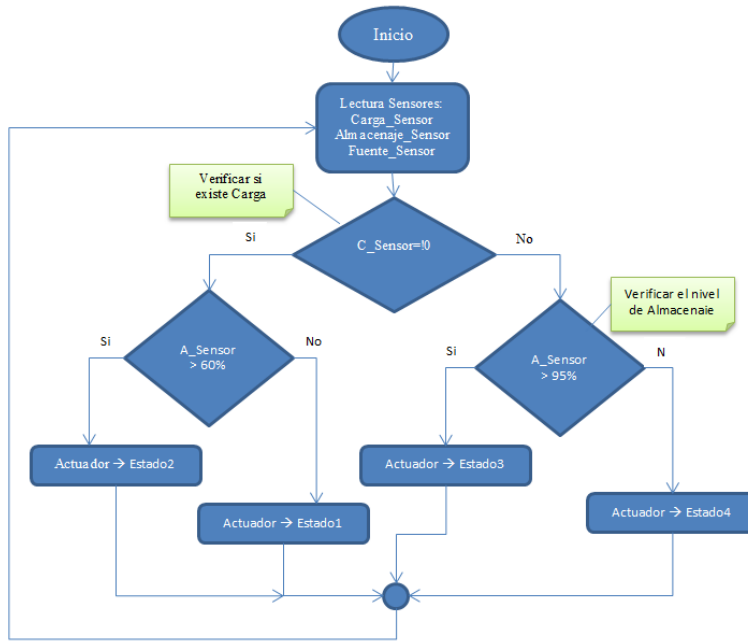


Figura 14. Algoritmo para modelo unitario de la microrred eléctrica.

El algoritmo que describe el comportamiento de los actuadores se muestran en las figuras 16, 17, 18 y 19, este algoritmo inicia verificando el número de cargas presentes en el sistema, para este caso verifica el Sensor\_Carga y el tipo de medida Estado\_Conexión, con este valor se puede saber cuándo una carga se conecta o desconecta a la microrred y dependiendo de esto tomar decisiones con respecto a los actuadores que se encuentran en las fuentes de generación y la red principal.

El algoritmo después de verificar el número de cargas conectadas en el sistema, evalúa si este valor es mayor a cero y se divide en dos decisiones globales. La primera es cuando existen cargas conectadas por lo que se verifican las fuentes de generación, su calidad de energía y el nivel de carga del sistema de almacenamiento. La segunda decisión es cuando no se presenta carga alguna, y el actuador de la

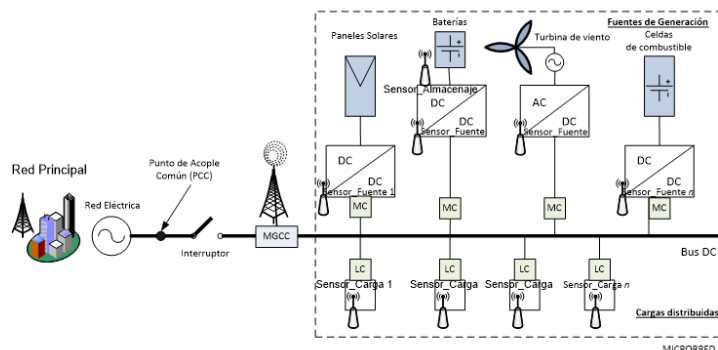


Figura 15. Modelo multi-nodal de microrred.

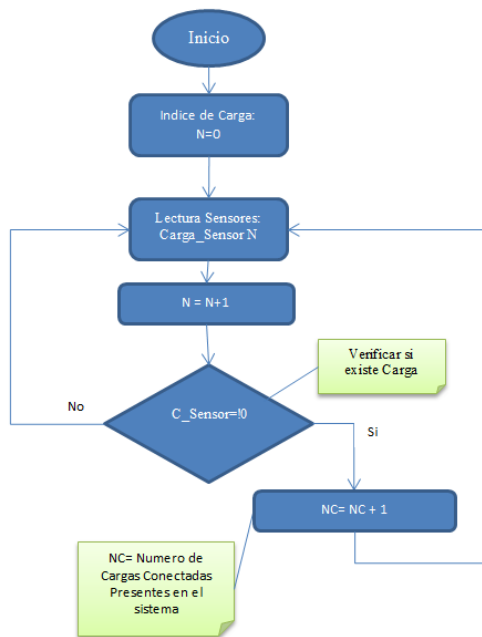


Figura 16. Algoritmo parte I modelo multi-nodal de microrred.

red principal se desconecta de la red de cargas, solo permitirá que se suministre energía de las fuentes de generación, o el Estado 3 en los actuadores.

En la primera decisión Global, se verifica la capacidad de generación de cada una de las fuentes de generación; los actuadores individuales de cada fuente y almacenamiento de energía se ubicaran en el Estado1, del modo contrario



SENSORES ARQUITECTURA MDA

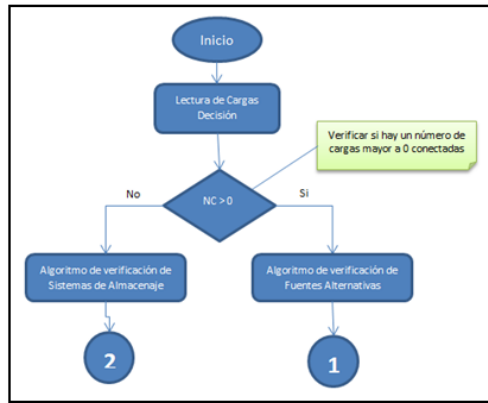


Figura 17. Algoritmo parte II modelo multi-nodal de microrred.

se ubicaran en el Estado4, que permite que la fuente cargue el sistema de almacenamiento de energía. Cuando está conectada alguna fuente de generación a la microrred, el modelo desconecta la red principal, hasta que el total de las fuentes no sean capaces de suministrar energía a las cargas conectadas.

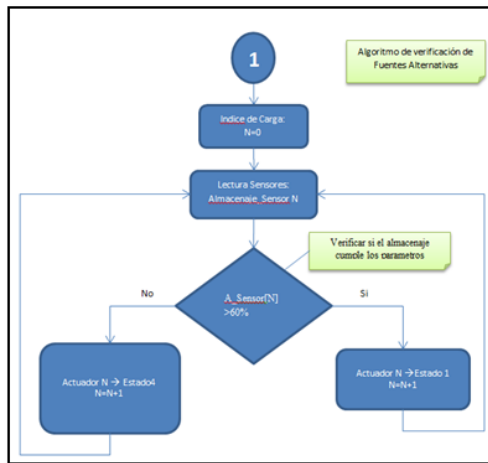


Figura 18. Algoritmo parte III modelo multi-nodal de microrred.

Por último cuando no se presenta una carga conectada en la microrred, el modelo verifica los sistemas de almacenamiento de energía y de fuente de generación, si estos cumplen con los mínimos requerimientos para suministrar

energía a la red principal, los actuadores se ubicaran en el Estado3, de lo contrario cada actuador se encontrar en el Estado4, para que la fuente cargue el sistema de almacenamiento de energía.

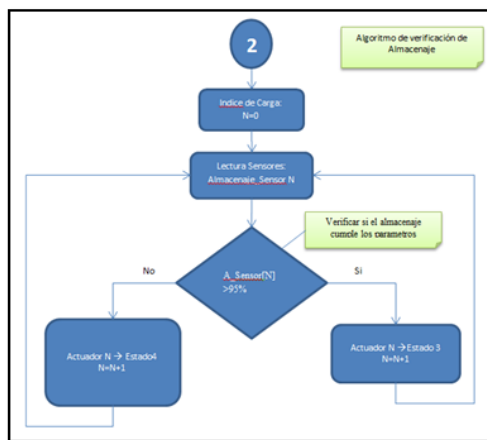


Figura 19. Algoritmo parte IV modelo multi-nodal de microrred.

## 7. Conclusiones

El acercamiento a un modelo de toma de decisiones en una Microrred, se centra en variables generales como voltaje, corriente, potencia, y control de fallos, pero se crea el marco general para incluir descripciones como, oferta y demanda de energía en el mercado actual, y modelos de predicción para consumo eficiente sobre la Microrred, estos modelos específicos se pueden agregar haciendo uso de la arquitectura MDA, sin afectar los modelos existentes y la compatibilidad con plataformas específicas.

La arquitectura de Red de WSN para microrredes eléctricas, es una arquitectura modular dividida en capas, que implementa un gran número de protocolos en cada capa. En el nivel de la comunicación *Wireless* se deben contar con un servicio de transmisión de datos en tiempo real, altamente confiable y capaz de competir con otras tecnologías de transmisión cableada, los protocolos actuales permiten que se pueda contemplar este tipo de comunicación, que depende a su vez de factores como el ancho de banda, esto debe ser planeado con cuidado, tomando aspectos técnicos, como tipos de codificación, tecnologías WAN utilizadas y tecnologías de última milla disponibles, con el fin de proveer un ancho de banda suficiente para proveer una disponibilidad cercana al 100 %, debido a la incidencia que tienen los sensores sobre la red eléctrica.

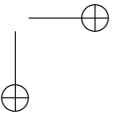
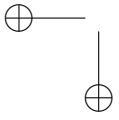
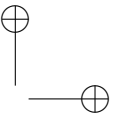
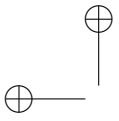
El uso de la arquitectura MDA permite a usuarios finales sin experiencia en el desarrollo de tecnologías emergentes facilitando la unión de componentes y las ventajas que ofrece este tipo de desarrollos es una solución factible para desplegar cualquier tipo de red de sensores en una Microrred.

## Referencias

1. H. B. Puttgen, P. R. Macgregor, and F. c. Lambert, “Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?,” *Power and Energy Magazine*, IEEE, no. february 2003, p. 8, 2003.
2. H. Hussein, S. Harb, and N. Kutkut, “Design considerations for distributed micro-storage systems in residential applications,” in *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 32nd International., 2010, p. 6.
3. R. V. P. Yerra, A. K. Bharathi, P. Rajalakshmi, and U. B. Desai, “WSN based power monitoring in smart grids,” in *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 2011 Seventh International Conference on, 2011, pp. 401–406.
4. N. D. Hatziaargyriou, S. Member, I. A. Dimeas, S. M. Ieee, A. G. Tsikalakis, and S. Member, “Management of Microgrids Environment in Market.”
5. J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids, A general approach toward standardization,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
6. R. Burrett, R. Dixon, M. Eckhart, D. Hales, and A. Kloke-lesch, “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21 Steering Committee,” Paris, 2009.
7. K. Shenai and K. Shah, “Smart DC micro-grid for efficient utilization of distributed renewable energy,” *Energytech*, 2011 IEEE, 2011.
8. W. Jiang and Y. Zhang, “Load Sharing Techniques in Hybrid Power Systems for DC Micro-Grids,” in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011, pp. 1–4.
9. A. Kwasinski and P. Krein, “A microgrid-based telecom power system using modular multiple-input dc-dc converters,” in *Telecommunications Conference, 2005. INTELEC’05. Twenty-Seventh International*, 2005, pp. 515–520.
10. J. Quesada, R. Sebastián, M. Castro, and J. a. Sainz, “Control of inverters in a low voltage microgrid with distributed battery energy storage. Part I: Primary control,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 126–135, Sep. 2014.
11. W. Huang, “Power flow analysis of a grid-connected high-voltage microgrid with various distributed resources,” in *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, 2011, pp. 1471–1474.
12. A. G. Kleppe, J. Warmer, W. Bast, and M. D. A. Explained, *The model driven architecture: practice and promise*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2003.
13. C. Hahn, C. Madrigal-Mora, and K. Fischer, “A platform-independent metamodel for multiagent systems,” *Auton. Agent. Multi. Agent. Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 239–266, 2009.
14. G. Benguria, X. Larrucea, B. Elvesaeter, T. Neple, A. Beardsmore, and M. Friess, “A platform independent model for service oriented architectures,” in *Enterprise interoperability*, Springer, 2007, pp. 23–32.
15. I. Khemapech, “Feasibility Study of Direct Communication in Wireless Sensor Networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 21, pp. 424–429, Jan. 2013.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

16. F. Escolar, S. Carretero, J. García, F., Isaila, F., “Acabando con los desarrollos Ad-Hoc en Wireless Sensor Networks,” 2006, p. XVII Jornadas de Paralelismo.
17. G. Engels, R. Heckel, and J. M. Kuster, “Rule-based specification of behavioral consistency based on the UML meta-model,” in UML 2001 The Unified Modeling Language. Modeling Languages, Concepts, and Tools, Springer, 2001, pp. 272–286.
18. T. C. Rodrigues, P. V. Dantas, F. C. Delicato, P. F. Pires, C. Miceli, and L. Pirmez, “Using MDA for building wireless sensor network applications,” in Proceedings - 4th Brazilian Symposium on Software Components, Architectures and Reuse, SBCARS 2010, 2010, pp. 110–119.
19. T. Rodrigues, T. Batista, and A. Y. Zomaya, “Model-Driven Approach for Building Efficient Wireless Sensor and Actuator Network Applications,” pp. 43–48, 2013.
20. K. Czarnecki and S. Helsen, “Classification of model transformation approaches,” in Proceedings of the 2nd OOPSLA Workshop on Generative Techniques in the Context of the Model Driven Architecture, 2003, vol. 45, no. 3, pp. 1–17.
21. A. Clark and C. J. Pavlovski, “Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks,” Computer (Long. Beach. Calif.), vol. II, 2010.
22. W. B. Heinzelman, A. L. Murphy, H. S. Carvalho, and M. A. Perillo, “Middleware to support sensor network applications,” Network, IEEE, vol. 18, no. 1, pp. 6–14, 2004.







## Toxicidad aguda de una formulación comercial de glifosato sobre *Poecilla reticulata* (pisces: poecilidae) en condiciones de laboratorio

### Acute toxicity of a comercial glyphosate formulation on *Poecilla reticulata* (pisces: poecilidae) in laboratory conditions

Francois Herrera Jacquelin\*, Karenn Eliana Beltran González\*\*, Jennifer Andrea Garzón González, Laura González Sánchez\*\*\*, Laura Milena Herrera Rivera†, Andrés Felipe Torres Cequera‡

Universidad Santo Tomás

FECHA DE ENTREGA: 18 DE FEBRERO DE 2016

FECHA DE EVALUACIÓN: 8 DE ABRIL DE 2016

FECHA DE APROBACIÓN: 2 DE MAYO DE 2016

**Resumen** El glifosato es un herbicida ampliamente usado en Colombia tanto en actividades agrícolas como para la erradicación de cultivos ilícitos. La deriva por viento en aspersiones aéreas y la lixiviación de este producto pueden contaminar los cuerpos de agua por lo que es importante medir su efecto tóxico. Poblaciones del pez *Poecilla reticulata* fueron sometidas a concentraciones de 0; 2.3; 5.5; 8.3; 11.0; 13.8 mg de glifosato/L en la formulación comercial Roundup® 747 SG /L, para determinar la mortalidad de los individuos tratados y la concentración letal 50 (CL<sub>50</sub>) en condiciones de laboratorio. La mortalidad fue evaluada a las 24, 48, 72 y 96 horas encontrándose que esta aumentó con la concentración del herbicida y con el tiempo transcurrido. También se observaron alteraciones en el patrón de nado de los peces estudiados El valor de la concentración letal 50 del glifosato sobre *P. reticulata* a las 96 horas de aplicados los tratamientos fue de 3.14 mg/L, lo que sugiere un impacto ecológico en ecosistemas naturales y un uso potencial de esta especie de pez como bioindicador de contaminación para este herbicida en ensayos de toxicidad aguda.

**Abstract** Glyphosate is an herbicide that is widely used in Colombia not only for farming, but also for illicit crop eradication. Wind drift in air spraying and the lixiviation of this product can contaminate water bodies

\* francoisherrera@usantotomas.edu.co

\*\* Kruncia707@hotmail.com

\*\*\* lauragonzalez@usantotomas.edu.co

† laumil146@yahoo.com

‡ andrestorresc@usantotomas.edu.co

and for this reason, it is important to measure its toxic effect. Fish such as the *Poecilla reticulata* were submitted to concentrations of 0; 2.3; 5.5; 8.3; 11.0; 13.8 mg of glyphosate/L in the commercial formula Roundup® 747 SG/L to determine the mortality of treated individuals and the lethal concentration 50 ( $LC_{50-96}$ ) in lab conditions. Mortality was tested at 24, 48, 72, and 96 hours, and we were able to find that it increased as the herbicide concentration and the time elapsed increased. We also noticed a variation in the swimming pattern of the fish studied. The value of the 50-lethal concentration glyphosate over *P. reticulata* during the first 96 hours that the treatment was applied was of 3.14 mg/L, which suggests an ecological impact in natural ecosystems and a potential use of this type of fish as a contamination bioindicator for this herbicide in extreme toxicity tests.

**Palabras Clave:** Bioensayo, concentración letal 50, glifosato, *Poecilla reticulata*, toxicidad aguda, roundup

**Keywords:** Bioassay, lethal concentration 50, glyphosate, *Poecilla reticulata*, acute toxicity, roundup

## 1. Introducción

El glifosato (N-fosfonometilglicina,  $C_3H_8NO_5P$ ) es un herbicida sistémico no selectivo desarrollado en los años 70 y originalmente comercializado bajo la marca Roundup® de la empresa Monsanto [1] [2], [3]. Actualmente, se distribuyen diferentes presentaciones comerciales como Rodeo®, Accord®, Kleen up®, entre otros [4]. Este herbicida de muy baja presión de vapor y alta solubilidad en agua actúa inhibiendo la 5-enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintetasa (EPSPS), enzima responsable de la formación de los aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina y triptófano [1]. El glifosato es un producto ampliamente usado a nivel mundial, se estima que se consumen unas 700,000 toneladas de este herbicida al año [5]. En Colombia se utiliza principalmente en actividades agrícolas: como secante de granos, madurante de la caña de azúcar y como herbicida en cultivos de arroz, pasto entre otros [4], también se utiliza en aspersiones aéreas para la erradicación de cultivos de coca y amapola desde el año 1992. Se reporta una aplicación acumulada en estos programas de 1,420,130 litros hasta el año 2004 y un área asperjada de 104.771 ha para el año 2009 [6] [7]. Como consecuencia de la deriva (movilización del herbicida por viento a áreas no blanco) y de la lixiviación, el glifosato puede contaminar las fuentes de agua [8]. Se ha evaluado su toxicidad en varias especies acuáticas indicadoras como bacterias, algas microscópicas, micro-crustáceos, anfibios y peces. La literatura reporta concentraciones letales 50 de glifosato en peces en un rango muy amplio que va de 10 a 210 mg/L para glifosato puro (grado técnico) y de 10 a 1000 mg/L en caso de glifosato en fórmulas comerciales (para doce especies de peces estudiadas y reportadas en múltiples fuentes) [9] [10]. Estudios realizados en Colombia reportan  $CL_{50-96}$  de 97.47 mg/L de glifosato para juveniles de cachama [8] [11] además de efectos en el sistema inmune y sensorial al ser expuestos a dosis subletales [12] [13]. La



## TOXICIDAD AGUDA FORMULACIÓN COMERCIAL DE GLIFOSATO

concentración letal reportada para microcrustaceos (*Daphnia* spp y *Gammarus* sp) es de 5.3 a 930 mg/L (para glifosato formulado) y de 44 a 5600 mg/L en ninfas de chironomidos (Insecta, Diptera) [3] [2]. Folmar (1979) reporta una contribución importante del surfactante POEA, con concentraciones letales de dos a tres órdenes de magnitud inferiores al del glifosato puro pero similar al del Roundup® en trucha arcoíris y en pez luna de agallas azules, principalmente en aguas duras [9] [4].

*Poecilla reticulata* (Familia Poeciliidae), es un pez de agua dulce conocido como gupy, cuya distribución natural abarca las Antillas, Mesoamérica y el norte de América del Sur: Venezuela, el norte de Brasil, Guyana Británica y Suriname. Esta especie es ampliamente cultivada y utilizada por acuaristas del mundo como pez ornamental o como alimento vivo para especies de peces más grandes por lo que actualmente su distribución es cosmopolita [14] [15]. Su manejo como indicador biológico presenta diversas ventajas: es fácil de obtener (su crianza es rápida y barata o se puede conseguir en criaderos comerciales de peces) es fácil de transportar y es muy resistente a condiciones de altas densidades poblacionales y bajas concentraciones de oxígeno. El presente estudio pretende evaluar la concentración letal 50 (CL<sub>50</sub>) del glifosato en su presentación comercial de Roundup® 747 SG en el gupy bajo condiciones de laboratorio, en búsqueda de modelos biológicos como bioindicadores de toxicidad por este tipo de compuestos.

## 2. Metodología

### 2.1. Sujetos experimentales

Para el experimento siguiendo los lineamientos para ensayos de toxicidad aguda de la OCDE [16] se utilizaron individuos jóvenes de cuatro a seis semanas de edad provenientes de una cría comercial privada y de diferentes desoves. Los individuos adquiridos, alrededor de 300, fueron trasladados al laboratorio de la Universidad Santo Tomás de Bogotá y mantenidos en dos acuarios de vidrio de 84 litros. Cada acuario tenía un aireadores, un filtro, luz natural, a una temperatura de  $20 \pm 1$  grados Celsius, y se alimentaron con una dieta comercial en forma de escamas, tres escamas diarias por pecera. Los peces se mantuvieron bajo estas condiciones durante 6 días antes del montaje del ensayo. Se hizo una selección de los individuos ( $n = 180$ ) de 2 a 2.5 cm de longitud ya que en ensayos preliminares se observó que estos fueron los que resistían mejor las condiciones experimentales.

### 2.2. Condiciones experimentales

Después del periodo de aclimatación antes descrito los peces fueron trasladados a los recipientes que contenían el agua con diferentes concentraciones de glifosato. Para el ensayo definitivo se utilizó como unidad experimental recipientes de PET (politereftalato de etileno) transparente con capacidad de 2 L, con 10 individuos cada uno. Durante el tiempo del ensayo no se usaron aireadores en los recipientes ni se alimentaron los peces y el agua se mantuvo a una temperatura de  $20 \pm 1$

°C.. El agua utilizada fue de la llave madurada durante 72 horas con un pH de 7.4 y una dureza total de 53 mg/L. Estas condiciones experimentales se basaron en ensayos preliminares en donde se evaluaron diferentes densidades de peces en un volumen de dos litros, encontrando que 10 individuos podían sobrevivir durante más de cinco días sin alimentación ni aireación. Toda manipulación se hizo utilizando una red de acuario de 5×7 cm tratando de minimizar el estrés de los individuos.

### 2.3. Determinación de la $CL_{50}$

Para los ensayos se utilizó como fuente del glifosato el producto Roundup® 747 SG; sal de monoamonio de N fosfometilglicina a una concentración de 74.7 % peso/peso. En ensayos preliminares se determinó que una concentración de 15 mg de Roundup® 747 SG /L causaban la muerte de la mayoría de individuos en un periodo menor a 24 horas. Basado en este hallazgo se establecieron seis tratamientos: un control sin glifosato y cinco concentraciones del producto comercial (3,1; 7,4; 11,0; 14,7 y 18,5 mg Roundup® 747 SG/L. La concentración del ingrediente activo para estos tratamientos fue de 2.3; 5.5; 8.2; 11.0; 13.8 mg glifosato/L respectivamente. Para cada tratamiento se montaron tres recipientes con diez individuos cada uno para un total de 30 individuos/tratamiento. Los tratamientos se observaron inmediatamente después de aplicados durante una hora y posteriormente cada 12 horas. La mortalidad de los peces fue registrada a las 24, 48, 72 y 96 horas después de aplicados los tratamientos y se hizo una descripción cualitativa de las alteraciones de nado de los sujetos experimentales.

### 2.4. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, posterior a la validación de los supuestos estadísticos de normalidad (*i.e.* prueba de Kolmogorov-Smirnov). para determinar las diferencias para la mortalidad de los individuos entre los tratamientos a las 96 horas de su aplicación. La  $CL_{50-96}$  se usó regresión logística (modelo logit) usando el programa estadístico pro-stat.

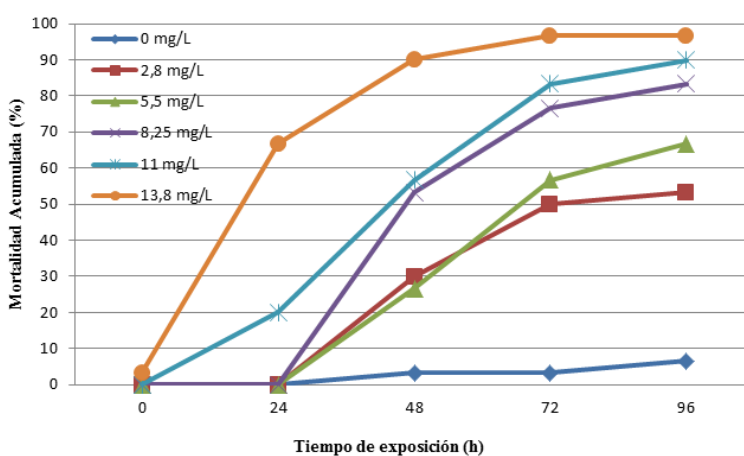
## 3. Resultados y discusión

Durante las primeras horas de la aplicación de los tratamientos los peces expuestos a 11 y 13.8 mg/L de glifosato, mostraron signos de hiperexcitación caracterizados por un nado a una velocidad mayor a la normal en el tercio superior del recipiente, similar a lo observado en los ensayos preliminares y consistente con los daños neurotóxicos citados en la literatura, [17], [18] [19] , no obstante, dichos daños no fueron letales inmediatos. Posterior a las 24 horas se presentó una disminución de la actividad de nado, caracterizada por movimientos lentos y un patrón de nado alterado (nado lateral). En los tratamientos con concentraciones más bajas (2.3; 5.5; 8.2mg/L) no se observaron cambios inmediatos en el patrón de nado, sin embargo en las observaciones a partir de las 24 horas se evidenció el letargo

TOXICIDAD AGUDA FORMULACIÓN COMERCIAL DE GLIFOSATO

de los individuos. No se observaron alteraciones en el nado en las unidades experimentales correspondientes al testigo.

En todos los tratamientos se observó una mortalidad dependiente del tiempo. En el grupo control la mortalidad fue muy baja (6.7 %) (Figura 1), sin embargo, se registraron niveles de 53, 67, 83, 90 y 96.7 % de mortalidad para los tratamientos de 2.8, 5.5, 8.3, 11 y 13.8 mg/L, respectivamente a las 96 horas de su aplicación. La baja mortalidad registrada en el grupo control (6.7 % a las 96 horas) permite inferir que las condiciones experimentales no tuvieron mayor incidencia sobre la mortalidad de los individuos tratados [16].



**Figura 1.** Mortalidad acumulada de los peces en el tiempo para las diferentes concentraciones de glifosato evaluadas.

Los dos tratamientos con mayor concentración de glifosato mostraron diferencias con respecto al testigo y a los tratamientos menos concentrados desde las primeras 24 horas. A las 48 horas todos los tratamientos con glifosato muestran un porcentaje de mortalidad alto con respecto al testigo. Al analizar los datos estadísticamente a las 96 horas (Figura 2) se observó una diferencia estadísticamente significativa entre cada uno de los tratamientos y el testigo con una confiabilidad del 95 % (del 92 % en el caso de la comparación entre el testigo y el tratamiento de 2.8 mg/L de glifosato). Los resultados estadísticos muestran tres grupos estadísticamente iguales entre sí y diferentes a los demás grupos (Figura 2): el primero es el testigo, el segundo los tratamientos de 2.8 y 5.5 mg/L y el tercero los tratamientos de 8.25, 11 y 13.8 mg/L. De este análisis se deduce que una concentración baja de glifosato (2.8 mg/L) ya tiene un efecto significativo en la mortalidad de los individuos. A partir de la dosis 8.25 mg/L las mortalidades a las 96 horas son tan altas que ya no muestran diferencias estadís-

ticamente significativas con respecto a los tratamientos con mayor concentración de glifosato.

	0 mg/l	2.8 mg/l	5.5 mg/l	8.25 mg/l	11 mg/l
2.8 mg/l	Si* P = 0.072				
5.5 mg/l	Si P = 0.013	No P = 0.3653			
8.25 mg/l	Si P < 0.000	Si P = 0.07	Si P = 0.039		
11 mg/l	Si P < 0.000	Si P = 0.01	Si P = 0.008	No P = 0.409	
13.8 mg/l	Si P < 0.000	Si P < 0.000	Si P = 0.002	No P = 0.112	No P = 0.409

**Figura 2.** Resultados de la comparación de medias de la mortalidad de *P. reticulata* sometida a cuatro concentraciones de glifosato comercial, a las 96 horas, mediante la prueba Kruskal Wallis. \* Sí existe diferencia con una confiabilidad del 90 %. Tomando una confiabilidad del 95 % el testigo y el tratamiento de 2.8 mg/l son estadísticamente iguales.

Al ajustar los datos a un modelo logístico se encontró un valor de 3.14 mg/L para la  $CL_{50-96}$ , este es un valor mucho menor que el que se reporta en la literatura para otras especies [2] Efectivamente la concentración letal 50 para alevinos de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) es de 97.47 mg/L [11], para truchas de diferentes especies (*Oncorhynchus* spp) entre 10 y 190 mg/L [20], para perca (*Leptomis macrochirus*) 120 mg/L [9]. Este valor tan bajo puede ser atribuido en parte a que no se está evaluando el glifosato puro sino que el glifosato en la formulación del Roundup® 747 SG, que además del ingrediente activo contiene surfactantes y excipientes que también pueden ser tóxicos en peces [9], este estudio no permite por tanto determinar cuál es la contribución específica del ingrediente activo y cuál es la de los otros elementos contenidos en la formulación comercial. *P. reticulata* podría entonces tener un potencial interesante para desarrollar protocolos de evaluación en campo que permitan confirmar la contaminación de cuerpos de agua cuando existan actividades que hagan uso de glifosato, como aplicaciones aéreas en cultivos lícitos como ilícitos. Sumado a las investigaciones realizadas por otros autores [2], [11], [9], [20] el presente trabajo evidencia la sensibilidad de los peces al glifosato, principalmente en individuos jóvenes, lo que en el ambiente natural puede conducir a desbalances ecológicos en los ecosistemas.

TOXICIDAD AGUDA FORMULACIÓN COMERCIAL DE GLIFOSATO

#### 4. Conclusiones

*Poecilla reticulata* es una especie que evidencia una alta sensibilidad a la exposición aguda a glifosato en su presentación comercial Roundup® 747 SG. Así, concentraciones de 2.8 mg/L son suficientes para causar mortalidades altas experimentalmente y esta especie registró una  $CL_{50-96}$  de 3.14 mg/L. Esta susceptibilidad de la especie sumada a otras ventajas de manejo y obtención de especímenes y la posibilidad de ser evaluada para otros xenobioticos.

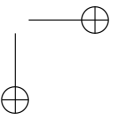
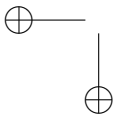
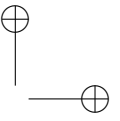
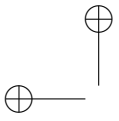
La baja  $CL_{50-96}$  de 3.14 mg/L, encontrada en este experimento refuerza la noción que el glifosato, puede tener un impacto negativo sobre los ecosistemas acuáticos, siendo así que dosis muy bajas pueden causar mortalidad de las especies de peces pequeños lo que impacta las cadenas tróficas de los mismos. Para desarrollar protocolos de bioindicación de contaminación por glifosato usando especímenes de *P. reticulata* es necesario determinar la sensibilidad de esta especie tanto al glifosato puro como a los excipientes y coadyuvantes más comunes en las formulaciones comerciales.

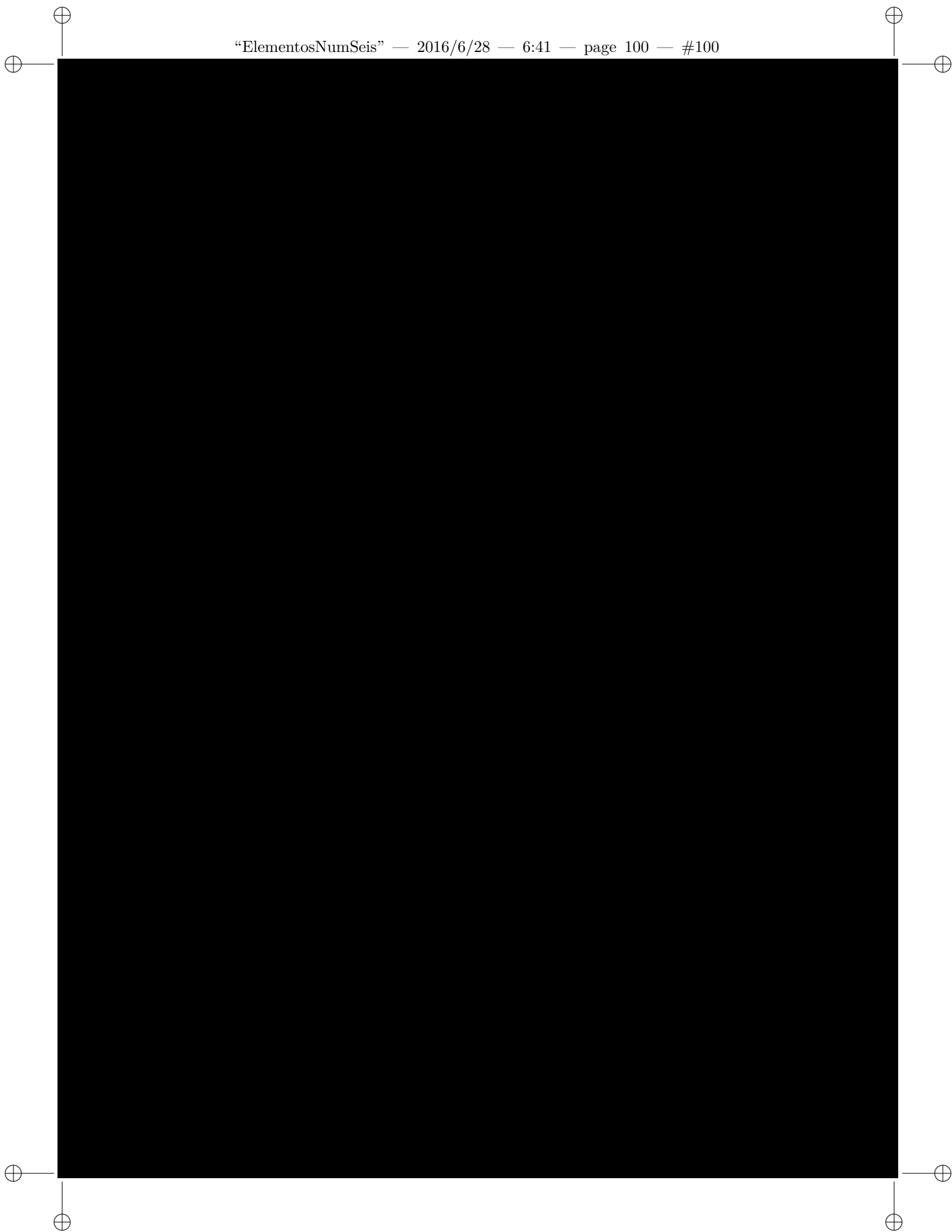
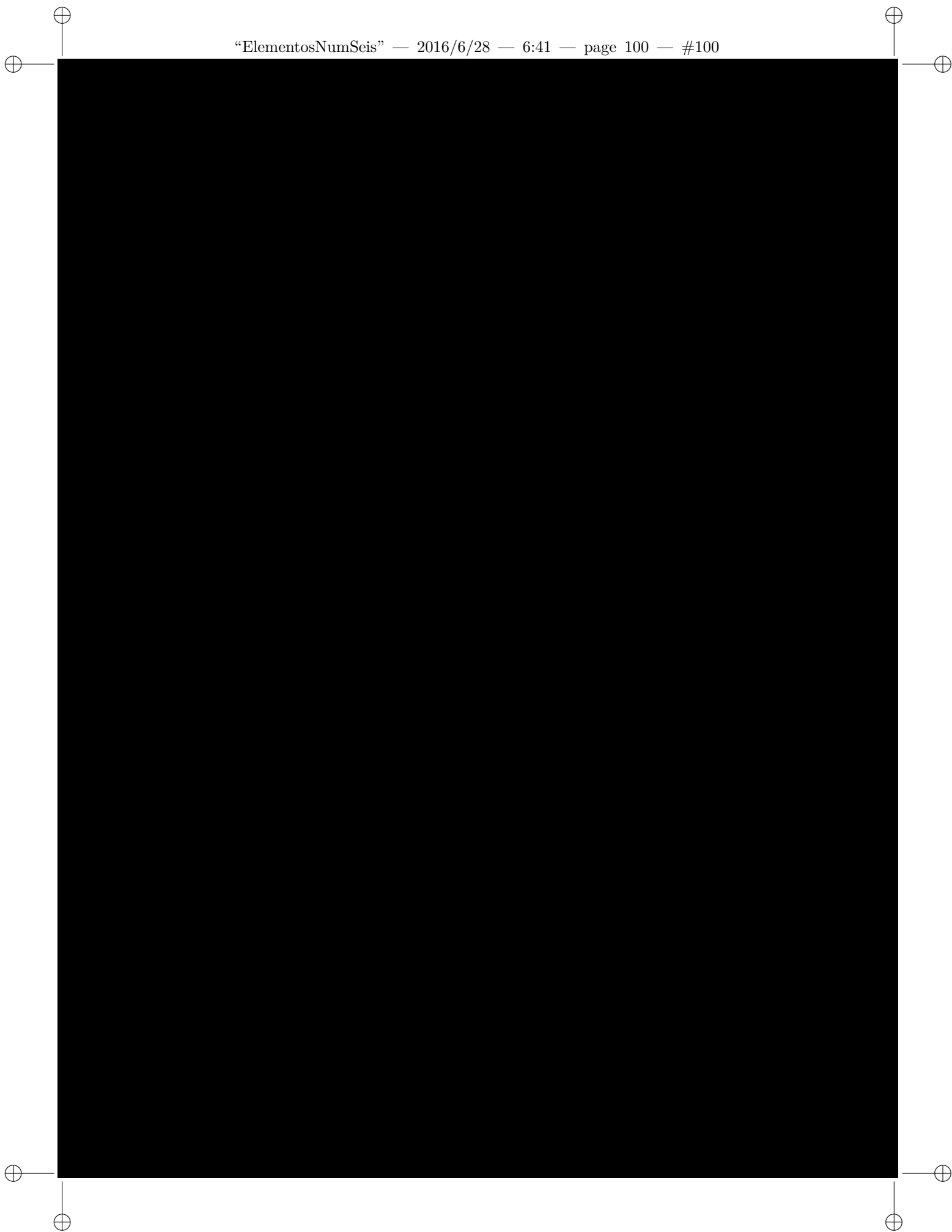
#### Referencias

1. Murtaza Alibhai and William Stallings, Closing down on glyphosate inhibition with a new structure for drug discovery, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 98, no. 6, pp. 2944-2946, March 1991.
2. WHO, International Programme on Chemical Safety. Glyphosate, Environmental health criteria 159, Geneve, 1994.
3. CONICET, Evaluación de la información científica vinculada al glifosato en su incidencia sobre la salud humana y el ambiente, Argentina, 2009.
4. Iang Rondón, Wilson Ramírez, and Pedro Eslava, Evaluación de los efectos tóxicos y concentración letal 50 del surfactante Cosmoflux 411F sobre juveniles de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, no. 20, pp. 431-446, 2007.
5. S.O Duke and S.B. Powles, Glyphosate: a once in a century herbicide, Pesticides Management Science, no. 64, pp. 319-325, 2008.
6. UNOC, Censo de cultivos de coca 2005 Colombia, monitoreo de cultivos de coca, Bogotá, 2006.
7. UNOC, Colombia: monitoreo de cultivos de coca 2009, Bogotá, 2010.
8. Pedro R. Eslava, Wilson F. Ramírez, and Iang S. Rondón, Sobre los efectos del glifosato y sus mezclas: Impacto en peces nativos, Orinoquia, Colombia, 2007.
9. L.C. Folmar, H.O. Sanders, and A.M. Julin, Toxicity of the herbicide glyphosate and several of its formulations to fish and aquatic invertebrates, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, no. 8, pp. 269-278, 1979.
10. M.L. Morgan and J.W. Kiceniuk, Response of rainbow trout to a two month exposure to Vision, a glyphosate herbicide., Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 48, pp. 772-780, 1992.
11. Wilson Ramírez-Duarte, Iang Rondón-Barragan, and Pedro Eslava-Mocha, Acute toxicity and histopathological alterations of Roundup herbicide on cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), Pesq. Vet. Bras., vol. 28, no. 11, pp. 547-554, 2008 Noviembre.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

12. Iang Rondón-Barragan, Glyphosate (Roundup) and Cosmoflux 411F induce oxidative stress in red-bellied pacu (*Piractus brachypomus*), *Orinoquía*, vol. 16, pp. 162-176, 212.
13. Edwin Gomez-Ramírez, Leslie Guzmán-Beltran, Pedro Eslava-Mocha, and Hernán Hurtado-Giraldo, Efecto de dosis subletales de un herbicida comercial en el sistema nervioso de alevinos de cachama blanca (*Piractus branchypomus*), *Orinoquia*, vol. 16, no. 2, Diciembre 2012.
14. Patricia Devezé, Juan Lorenzo Reta, and Basilio Sánchez, Cultivo de *Poecilia reticulata* (Pisces: Poeciliidae) en cuerpos de agua tropicales, Veracruz, México, *Revista de biología tropical*, vol. 52, no. 4, pp. 951-958, 2004.
15. R. L. Welcomme, International introductions of inland aquatic species, FAO fisheries technical paper, no. 294, 1988.
16. OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), Fish acute toxicity test, in OECD guideline for testing of chemicals., 1992.
17. R.J. Menéndez-Helman, G.V. Ferreyroa, M. dos Santos Alfonso, and A. Salibián, Glyphosate as an acetylcholinesterase inhibitor in *Cnesterodon decemmaculatus*, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 88, no. 1, pp. 6-9, 2012.
18. Nicole Roy, Bruno Carneiro, and Jeremy Ochs, Glyphosate induces neurotoxicity in zebrafish, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, pp. 45-54, Enero 2016.
19. Samanta Palas, Pal Sandipan, Kumar Murkherjee Alope, and Ratan Ghosh Apurba, Biochemical effects of glyphosate based herbicide, Excel Mera 71 on enzyme activities of acetylcholinesterase (AChE), lipid peroxidation (LPO), catalase (CAT), glutathione-S-transferase (GST) and protein content on teleostean fishes, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 107, pp. 120-125, September 2014.
20. M T Wan, R G Watts, and D J Mould, Effects of difernt dilution water types on te acute todocity of juvenile pacific salmonids and rainbow trout of glifosate and its formulated products, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 43, no. 3, pp. 378-385, 1989.









## Determinación de la longitud de onda máxima por barrido espectral dentro del rango ultravioleta visible (UV-VIS)

### Length Determination of Maximum Waves by Spectrum Sweep within an Ultraviolet-visible Spectral Region (UV-VIS)

Gema Eunice Acosta Niño\*, Alejandro Bourdon, Dennis Isabel Guitierrez

Universidad Militar Nueva Granada. Grupo de investigación: InQuiBio

FECHA DE ENTREGA: 18 DE ENERO DE 2016  
FECHA DE EVALUACIÓN: 18 DE MARZO DE 2016  
FECHA DE APROBACIÓN: 22 DE ABRIL DE 2016

**Resumen** El presente trabajo hace parte de un proyecto desarrollado en La Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, con el se ha elaborado un prototipo para La recuperación de metales provenientes de la pequeña y mediana industria del sector galvánico, específicamente en la ciudad de Bogotá. Como resultado del mismo se ha incursionado en métodos analíticos los cuales permiten determinar la concentración de los metales a retirar en aguas, y su contenido después de haber realizado la electrocoagulación, estos métodos en general requieren del uso de equipos sofisticados para estos análisis, los cuales las pequeñas y medianas industrias no están en capacidad de adquirir. Es bien sabido que en el último siglo se ha generado una gran cantidad de material contaminante en los acuíferos, provenientes del sector agropecuario, aguas domésticas e industria, causando gran afectación a suelos. Para mitigar el impacto ambiental, se busca cuantificar estos residuos en muestras acuosas controlando concentraciones de vertimientos generados por las industrias. Comúnmente se usa la técnica de absorción atómica en la cuantificación, pero los altos costos de los equipos hacen inviable la absorción atómica para los laboratorios no especializados. Por esta razón, se busca adaptar una técnica analítica en espectrofotométrica visible que permitan determinar  $Zn^{2+}$ , para ello es necesario determinar la longitud de onda optima a la cual se debe trabajar en el espectrofotómetro, con las cantidades adecuadas de reactivos que desarrollen un cromóforo apropiado para realizar cada lectura. Dentro de este estudio se analizan parámetros con respecto al tiempo, temperatura y pH, para establecer las mejores condiciones en las cuales se produce el cromóforo, para obtener una lectura adecuada en la absorbancia, cuyo valor es usado para la elaboración de

\* [gema.acosta@unimilitar.edu.co](mailto:gema.acosta@unimilitar.edu.co)

la curva de calibración que permita interpolar los valores de contenido de  $Zn^{2+}$ , para poder cuantificar.

**Abstract** This paper is part of a project carried out by Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, in order to create a prototype for the recovery of metals coming from small and medium-sized enterprises belonging to the galvanic sector in Bogotá. As a result, we used analytical methods that allowed us to determine the metal concentration in the water as well as its content after carrying out the electrocoagulation. Generally, these methods require using sophisticated equipment, and small and medium-sized enterprises cannot afford it. During the last century, a huge amount of polluting material coming from farming, domestic, and industry water has been generated in aquifers, which affects the soil.

In order to mitigate the environmental impact, we look to quantify these remains in watery samples by controlling concentrations of wastewater discharges generated by industries. Usually, the atomic absorption technique is used when quantifying, but the high cost of the equipment does not allow non-specialized laboratories to use it. For this reason, we want to adapt an analytic technique in visible spectrophotometric that enables the determination of  $Zn^{2+}$ . In order to do this, it is necessary to determine the length of the optimum wave the spectrophotometer should use, along with the right amount of reactants to develop the right chromophore for each reading. This study also analyzes parameters regarding time, temperature, and pH in order to establish the best conditions a chromophore is produced and to obtain an adequate absorbency reading, whose value is used to elaborate the calibration curve that allows interpolating  $Zn^{2+}$  content values in order to quantify.

**Palabras Clave:** cromóforo; absorbancia, calibración.

**Keywords:** chromophore, absorbency, calibration.

## 1. Introducción

Como seres humanos un recurso vital para nuestro desarrollo social es el agua potable, del cual hay disponible en la actualidad un 0,025 % del total en todo el planeta, Colombia es el sexto país con mayor potencial hídrico, pero sucede que la mitad de este potencial tiene altos niveles de contaminación, debido a que en el último siglo se ha generado una gran cantidad de material contaminante en los acuíferos. Las principales fuentes de contaminación en el agua potable, son las aguas residuales emanadas por el sector agropecuario, las aguas domésticas y la industria. La última se estima genera nueve mil toneladas de material contaminante. Los mayores contaminantes del agua potable son los hidrocarburos y compuestos con metales pesados como mercurio (Hg), plomo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), cinc (Zn), selenio (Se) y cadmio (Cd).

Dentro de las industrias que generan estos contaminantes encontramos al sector minero, siderúrgico, petrolero, químico, alimenticio, curtiembres y metalúrgico. Este último es conocido por los altos vertimientos de metales pesados utilizados en recubrimientos que se realizan a superficies metálicas, principalmente con

LONGITUD DE ONDA BARRIDO ESPECTRAL

$\text{Cr}^{6+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , siendo el  $\text{Zn}^{2+}$  ambientalmente tóxico en bajas concentraciones (mayor a 5 ppm), estipulado por la resolución 1074 de 1997 expedida por el Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) en Colombia.

Para mitigar el impacto ambiental, se busca cuantificar estos residuos en muestras acuosas para controlar las concentraciones de vertimientos generados por las industrias. Comúnmente se usa la técnica de absorción atómica en la cuantificación, pero los altos costos de los equipos hacen inviable la absorción atómica para los laboratorios no especializados. Por esta razón, se busca adaptar una técnica analítica en espectrofotométrica visible que permitan determinar  $\text{Zn}^{2+}$ , para ello es necesario determinar la longitud de onda óptima a la cual se debe trabajar en el espectrofotómetro, con las cantidades adecuadas de reactivos que desarrollen el cromóforo apropiado para realizar una lectura. Dentro de este estudio se analizan parámetros con respecto al tiempo, temperatura y pH, para establecer las mejores condiciones en las cuales se produce el cromóforo, para obtener una lectura adecuada en la absorbancia, cuyo valor es usado para la elaboración de la curva de calibración (esto realizado en otra investigación).

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del complejo coloreado (cromóforo) se desarrollaron dos técnicas (cuadros 1 y 2) las cuales fueron evaluadas para elegir el cromóforo más estable a condiciones como: temperatura, pH, exposición a la luz y tiempo.

Muestra (50 ppm $\text{Zn}^{2+}$ )	300 $\mu\text{l}$
Agua	1900 $\mu\text{l}$
Etolol	300 $\mu\text{l}$
Ditizona	2500 $\mu\text{l}$
Volumen total	5000 $\mu\text{l}$

**Cuadro 1.** Técnicas para el desarrollo del cromóforo. Ensayo 1. El orden de adición de los reactivos es el mismo orden según el cuadro.

Una vez generado los dos métodos se buscó aquel cuya intensidad era perceptible al realizar el barrido espectral en el espectrofotómetro visible marca SPECTRONIC 20 entre los 325 nm y 1100 nm, determinando la longitud de onda a la cual se logra mayor absorbancia.

De acuerdo a las técnicas para el desarrollo del cromóforo se obtiene alta sensibilidad en el ensayo 1 (Ditizona), ya que genera una intensidad semejante al ensayo 2 (Difenilcarbazida), aunque se encuentra en menor concentración el  $\text{Zn}^{2+}$  en el ensayo 1.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

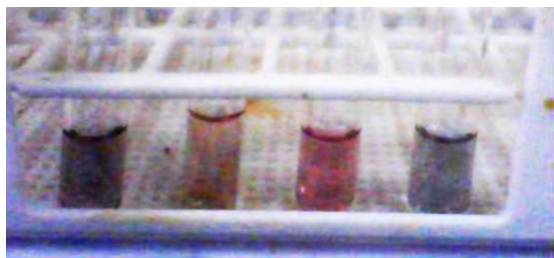
Muestra (50 ppm $Zn^{2+}$ )	2500 $\mu$ l
Agua	2250 $\mu$ l
$NH_4OH$	50 $\mu$ l
Difenilcarbazida	200 $\mu$ l
Volumen total	5000 $\mu$ l

**Cuadro 2.** Técnicas para el desarrollo del cromóforo. Ensayo 2. El orden de adición de los reactivos es el mismo orden según el cuadro.

### 3. Resultados y discusión

A continuación se presentan las evidencias fotográficas del color generado por el cromóforo generado con ditizona sometido a las diferentes variables: tiempo (60 min), luz solar (durante 60 min), temperatura (50 °C durante 60 min) (figura 1) y variación de pH (figura 2).

De acuerdo a la figura 1 no se observa homogeneidad en el color del cromóforo, lo cual indica que este es sensible tanto a la exposición a la luz, a ser sometido a una alta temperatura manejando como constante un tiempo de 50 minutos para cada muestra.

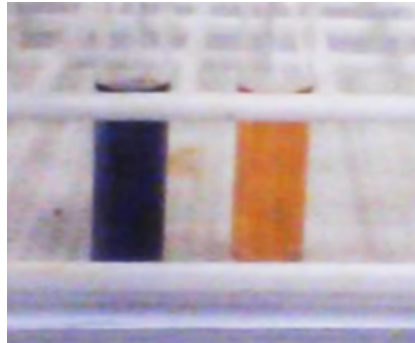


**Figura 1.** Cambio en el cromóforo de  $Zn^{2+}$  con ditizona sometido a tres variables. a) Cromóforo no expuesto y recién preparado, b) cromóforo expuesto a la luz del sol, c) cromóforo expuesto a una temperatura de 50 °C, d) cromóforo expuesto a la oscuridad y sin temperatura. Cada muestra expuesta a un tiempo de 50 minutos.

Al ser sometida la muestra a pH ácido y básico se confirma la poca estabilidad del cromóforo ya que el color desarrollado vira fuertemente de un pH a otro, por lo tanto el valor aconsejado puede estar cerca la neutralidad.

Teniendo como referencia esto, el protocolo escogido fue el color desarrollado con la difenilcarbazida ya que este cromóforo no presenta variación de color sometiendo la muestra a las mismas variables mencionadas anteriormente para el caso de la ditizona.

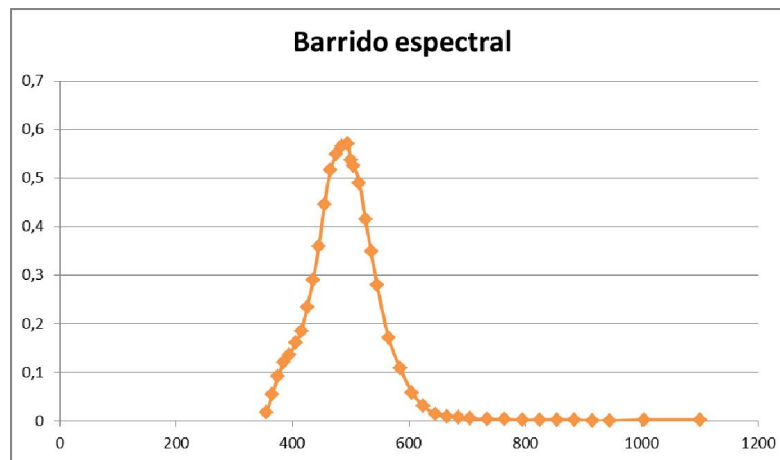
LONGITUD DE ONDA BARRIDO ESPECTRAL



**Figura 2.** Variación del cromóforo  $Zn^{2+}$  con Ditizona ante el cambio del pH. Lado izquierdo: pH ácido; lado derecho: pH básico.

Se recomienda tomar lectura inmediatamente se desarrolle el color para mayor precisión en los datos.

Luego de esto, se realiza el barrido espectral (figura 3) en donde se evidencia el máximo de absorbancia en la longitud de onda de 495 nm.



**Figura 3.** Absorbancia vs. Longitud de onda para cromóforo de  $Zn^{2+}$  y difenilcarbazona.

#### 4. Conclusión

De acuerdo al procedimiento realizado para el desarrollo del cromóforo se determinó que la difenilcarbazida es viable como reactivo para alcanzar una coloración adecuada y hacer lectura a 495 nm.

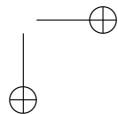
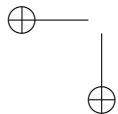
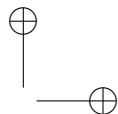
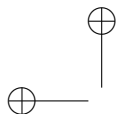
Este trabajo permite explorar la posibilidad de establecer la presencia de  $Zn^{2+}$  en soluciones acuosas mediante espectrofotometría dentro del rango UV-Vis.

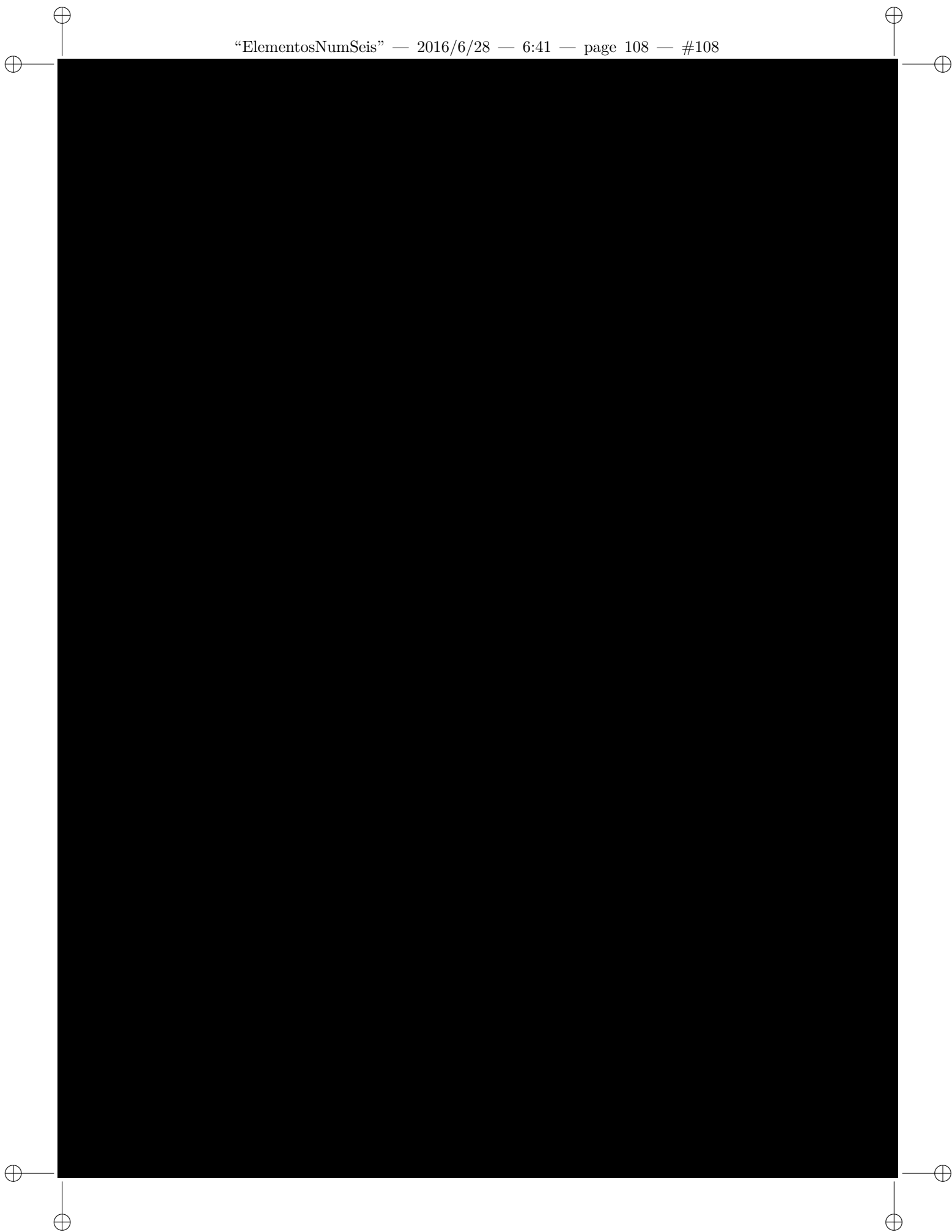
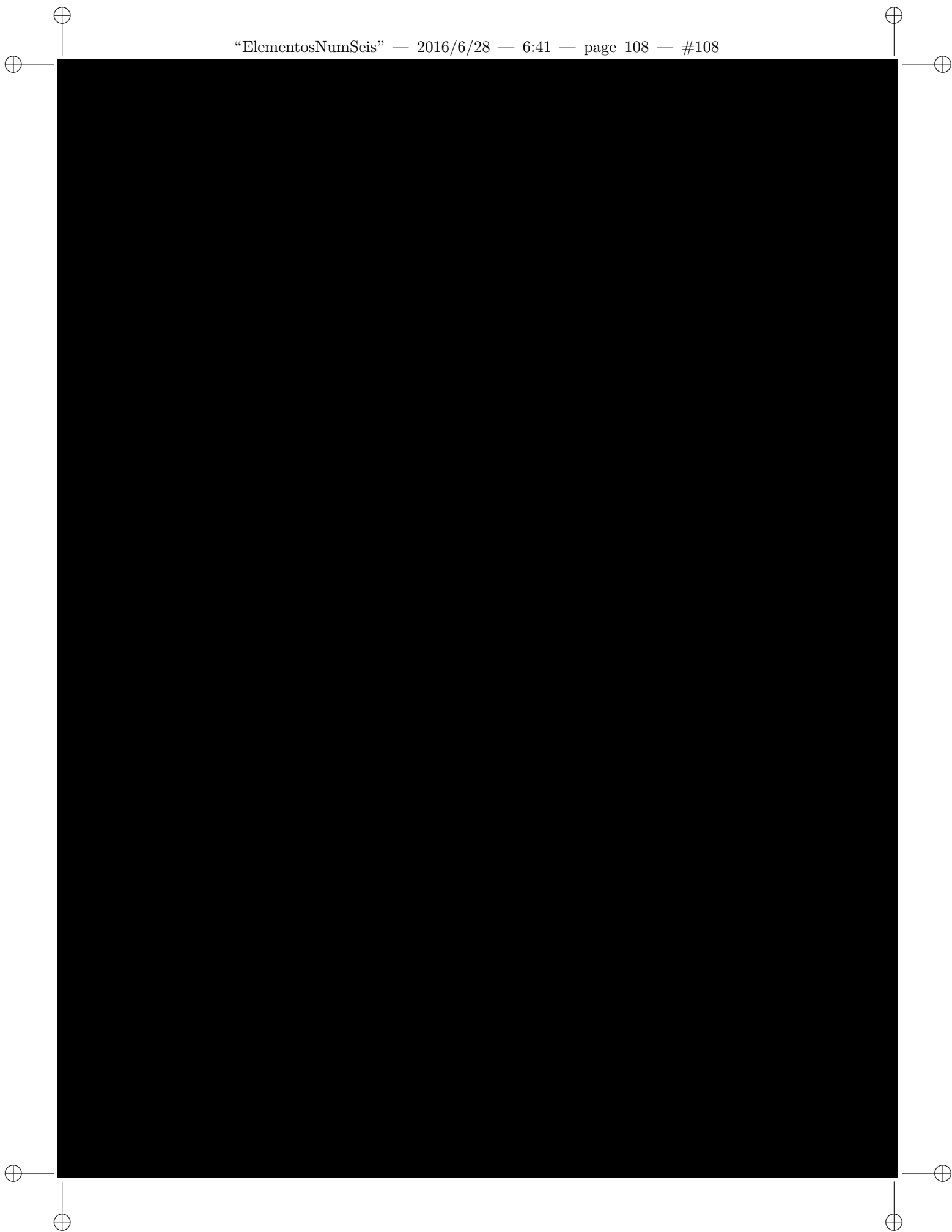
#### Agradecimientos

Laboratorios Universidad Militar Nueva Granada

#### Referencias

1. DAMA. (1997). Resolución 1074 . Bogotá D.C.
2. Flores Mariños, B. M. (2011). Diseño y validación de un metodo de análisis por espectrofotometría UV-vis para cinc (II) y mercurio (III) en muestras acuosas. Pontificia Universidad Católica del Perú .
3. Kalpakjian, Serope. Schmid, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. México, 2002. 4ta. Ed. Prentice Hall
4. Yuan, D., Fu, D., Wang, R., & Yuan, J. (2008). Rapid determination of chromium(VI) in electroplating waste water by use of a spectrophotometric flow injection system. *Spectrochimica* , 276-279
5. Gonzalez, Ricardo. El 50% del agua en Colombia es de mala calidad. UN Periódico [en línea]: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/el-50-del-agua-en-colombia-es-de-mala-calidad.html>
6. GREENPEACE. Disponibilidad del recurso. GREENPEACE [en línea]: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>
7. UNAL. Contaminación. UN Periódico [en línea]: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000088/lecciones/seccion4/capitulo10/04\\_10\\_04.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000088/lecciones/seccion4/capitulo10/04_10_04.htm)









# Evaluación del potencial de generación fotovoltaica en la ciudad de Quibdó, Chocó

## Evaluation of the Feasibility of Implementing Photovoltaic Electric Power in Quibdó, Chocó

Héctor David Agudelo Arias<sup>1\*</sup>, Lubin Delgado Arroyo<sup>1\*\*</sup>, Andrés Julián  
Aristizabal Cardona<sup>3\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Maestría en Ingeniería – Gestión  
Sostenible de la Energía

<sup>2</sup> Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Departamento de Ingeniería, Bogotá,  
Colombia

FECHA DE ENTREGA: 19 DE ENERO DE 2016  
FECHA DE EVALUACIÓN: 10 DE MARZO DE 2016  
FECHA DE APROBACIÓN: 22 DE ABRIL DE 2016

**Resumen** En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación realizada a series de datos climáticos para obtener los promedios de radiación solar y temperatura en el Municipio de Quibdó, con el fin de determinar la factibilidad en la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaica conectados a la red eléctrica.

Para esta evaluación se tomaron como referencia las bases de datos de la estación meteorológica instalada en la Universidad Tecnológica del Chocó y la del IDEAM-110450010; que se encuentra ubicada en el Aeropuerto el Cariño de la Ciudad de Quibdó.

Los resultados obtenidos muestran que los meses con mayor radiación son Junio y Julio alcanzando valores aproximados de 3.83 kWh/m<sup>2</sup> y los de menor radiación Abril, Agosto y Noviembre con valores aproximados de 1.59 kWh/m<sup>2</sup>. La temperatura presenta un comportamiento bastante definido con valores promedios máximos de 26 °C y promedios mínimos de 22 °C.

**Abstract** This paper presents the results of the evaluation carried out to a series of climatic data in order to obtain the average of solar radiation and temperature in the municipality of Quibdó. This was done in order to determine the feasibility of implementing photovoltaic electric power generation systems connected to the electric network.

For this evaluation, we used as a reference the database of the meteorological station located at the Universidad Tecnológica del Chocó and the one belonging to the IDEAM - 110450010, located at *El Cariño* Airport in Quibdó.

\* [hectord.agudelo@utadeo.edu.co](mailto:hectord.agudelo@utadeo.edu.co)

\*\* [lubin.delgado@utadeo.edu.co](mailto:lubin.delgado@utadeo.edu.co)

\*\*\* [andresj.aristizabal@utadeo.edu.co](mailto:andresj.aristizabal@utadeo.edu.co)

The results obtained show that the months with greater radiation are June and July, reaching approximated values of 3.83 kWh/m<sup>2</sup> and the ones with less radiation are April, August, and November, approximated values of 1.59 kWh/m<sup>2</sup>. The temperature presents a well-defined behavior with maximum average values of 26 °C and minimum of 22 °C.

**Palabras Clave:** radiación solar, temperatura, energía solar.

**Keywords:** solar radiation, temperature, solar energy.

## 1. Introducción

La energía solar fotovoltaica (FV) es única dentro de las diversas tecnologías de generación de electricidad. No requiere consumo de combustible y a menudo no involucra partes móviles, genera electricidad libre de emisiones con costos de operación y mantenimiento relativamente bajos; aún en lugares remotos. Adicionalmente, la energía FV es altamente modular y escalable, con rangos de instalación desde a escala de potencia de luces de jardín hasta a escala de potencia del orden de los megavatios de grandes centrales de electricidad.

El departamento del Chocó posee gran biodiversidad e importancia ecológica que contribuye al equilibrio ambiental a nivel mundial. Se encuentra ubicado al noroccidente de Colombia y su capital es Quibdó (05° 43'N, 76° 37'W, 53m).

Para evaluar el comportamiento y producción de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR) eléctrica, es importante tener en cuenta las variables de las cuales este depende: el recurso solar disponible y temperatura ambiente en el sitio de instalación. En el Municipio de Quibdó se presentan comportamientos variados para la radiación solar. Dichos comportamientos están dados por las abundantes lluvias, nubosidad y humedad. Se registran datos para precipitación aproximados de 1,500 mm anuales, con un comportamiento altamente irregular y un 80 % de humedad relativa. La temperatura presenta un máximo y un mínimo marcadamente definido con un comportamiento monomodal donde se presentan valores de temperatura máxima entre 27 y 31 °C, y los mínimos entre 22 y 24 °C.

En Colombia, en el año 2001 se decretó la Ley 697 mediante la cual se declara el uso racional y eficiente de la energía (URE) con el objetivo de fomentar el uso de energías renovables como un asunto de interés nacional y de compromiso con el medio ambiente. Posteriormente, en Mayo de 2014 se decreta la Ley 1715 con el fin de regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Estas acciones gubernamentales crean nuevos escenarios energéticos en materia de regulación, mercados, economía, instalación y tecnología en energía que representan un nuevo reto para el país.

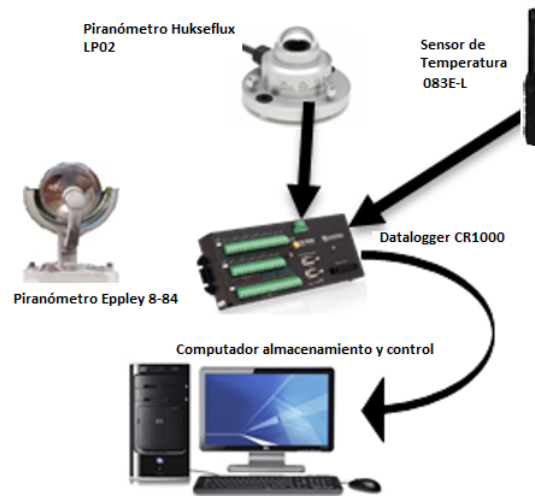
En este documento se presentan inicialmente (sección 2), las características del sistema de medición de radiación y temperatura. En una segunda instancia (sección 3) se aborda el análisis de los resultados de las series de datos de radiación y temperatura adquiridos y finalmente en esa misma sección, se discute la factibilidad para el uso de energía solar fotovoltaica en la ciudad de Quibdó; al tiempo que se compara con Bogotá y Berlín (Alemania). Por último se exponen las conclusiones del estudio.

## 2. Materiales y métodos

El procedimiento metodológico empleado en este trabajo consta de dos etapas: en la primera se evalúan las variables meteorológicas involucradas (radiación solar y temperatura ambiente) y en la segunda se realiza un análisis de factibilidad de generación eléctrica utilizando la herramienta de *software* Retscreen.

Dentro de las primeras actividades del proyecto, se seleccionaron los sensores adecuados para la medición de cada una de las variables físicas, así como el lugar de instalación de la estación de medición en la Universidad Tecnológica del Chocó - UTCH. Una vez analizados estos criterios es conveniente instalar una torre en un lugar que permita la incorporación a una distancia razonable del piranómetro para medir la radiación solar global.

Luego de este proceso es necesario recopilar o adquirir la información en una computadora para su posterior análisis. Para ello es necesario utilizar un datalogger como sistema de adquisición de datos para convertir y guardar la información de los sensores involucrados. La figura 1 presenta el diagrama de bloques general de la estación de medición.



**Figura 1.** Esquema de instalación de equipos de la estación meteorológica UTCH.

El acondicionamiento de los sensores del sistema de medida sigue siendo tradicional, es decir que se debe seguir el proceso normal de traducción de las señales análogas de cada uno de los sensores para que los valores de tensión y corriente sean acordes a cada una de las variables físicas establecidas.

En principio se realizó un estado del arte de dispositivos similares para determinar las necesidades técnicas para la implementación de la plataforma de estudio y el acondicionamiento de los sensores para adquirir la información.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

Luego de establecer dichas necesidades se asignaron las siguientes prioridades para obtener mejores resultados en el proyecto.

- Diseño físico de la estación para instalar los sensores.
- Elementos de hardware necesarios para la estación.
- Caracterización de la variable y adquisición de la misma.

### 2.1. Medición de radiación solar

Los datos obtenidos de la estación meteorológica de la UTCH para los años 2010 a 2012, fueron proporcionados por el piranómetro Eppley 8-84. En este radiómetro la dependencia de la temperatura está dentro de más o menos 1,5 % por encima de la temperatura ambiente, y dentro del rango de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a más  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La linealidad está dentro de 1 % de 0 a  $1400\text{ W/m}^2$ . Su respuesta Coseno es de 2 % desde  $0$  a  $70^{\circ}$  ángulo zenit, y un 5 % desde  $70$  a  $80^{\circ}$  ángulo zenit. Su sensibilidad es de  $10\text{ }\mu\text{V/W/m}^2$  y su impedancia es de  $350\text{ Ohms}$  aproximadamente.

Para los años 2013 a 2015 los datos fueron adquiridos por el piranómetro de marca Hukseflux Thermal Sensor: en este radiómetro la dependencia de la temperatura está dentro de más o menos 3 % por encima de la temperatura ambiente y dentro del rango de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a más  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La linealidad está dentro de  $\pm 1\%$  de 100 a  $1000\text{ W/m}^2$ . Su sensibilidad es de  $15\text{ }\mu\text{V/W/m}^2$ . De acuerdo a la norma ISO 9060 es un pirómetro de segunda clase.

Heliógrafo (Campbell-Stokes): Es utilizado para medir el brillo solar, es decir el número de horas que brilla el sol por día en una determinada localidad. Este instrumento consta de una lente esférica que produce una imagen del sol sobre el papel tratado químicamente y que además tiene impresa una escala horaria. El papel se alcanza a quemar cuando el nivel de radiación global es superior a  $120\text{ W/m}^2$ . De esta forma se puede medir sobre el papel el número de hora que brilla el sol en un día. El heliógrafo que registra las horas de brillo solar es un instrumento de uso manual.

Las series de datos de radiación solar global para el año 2012 que no se encontraban disponibles en la estación UTCH fueron obtenidas de la estación del IDEAM- 110450010; que se encuentra ubicada en el Aeropuerto el Cariño de la Ciudad de Quibdó.

### 2.2. Medición de temperatura ambiente

Para medir la temperatura ambiente en la estación UTCH se empleó una sonda 083E-L que permite además de medir la humedad relativa del ambiente, medir la temperatura utilizando un termistor con un rango de medición comprendido entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una exactitud de  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3. Sistema de adquisición de datos

El datalogger empleado marca Campbell Scientific referencia CR-1000 es controlado por un computador que realiza un barrido cada un segundo de los distintos

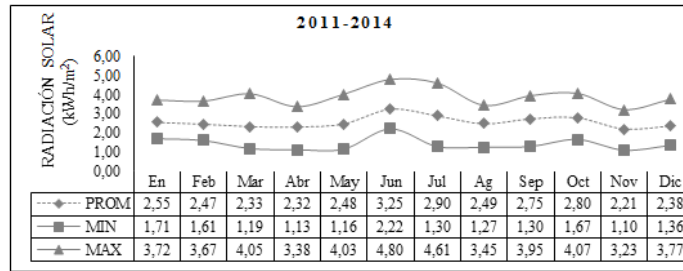
GENERACIÓN FOTOVOLTAICA QUIBDÓ

canales conectados, midiendo la tensión correspondiente a cada señal que es transferida al computador que la transforma en irradiancia ( $W/m^2$ ). Los valores de irradiancia son integrados cada hora y almacenados para análisis posteriores.

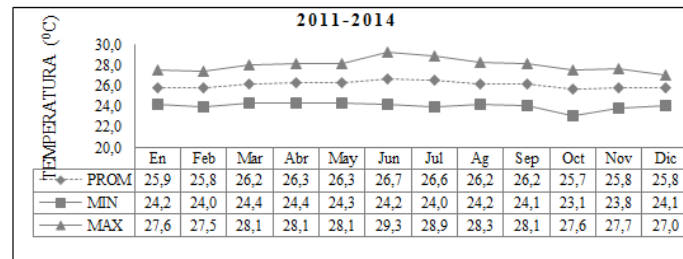
### 3. Análisis y resultados

#### 3.1. Análisis estadístico descriptivo de los datos de radiación solar

La radiación solar (Figura 1) durante los 4 años analizados (2011-2014) presenta grandes variaciones en cuanto la incidencia en esta zona, donde se puede observar que su máxima radiación se presenta en el mes de Junio y su mínima radiación en los meses de Abril y Noviembre. El valor máximo mensual de los promedios de radiación durante los cuatro años analizados (Figura 2) es de 4.80  $kWh/m^2$ . La temperatura ambiente registró un promedio anual de 28,3 °C para los cuatro años analizados como se presenta en la figura 3.



**Figura 2.** Valores medios, máximos y mínimos de radiación solar, 2011-2014. Estación UTCH.



**Figura 3.** Valores medios, máximos y mínimos de temperatura, 2011-2014. Estación UTCH.

En la figura 4, se muestran los perfiles diarios de radiación solar medidos con la estación desarrollada para los días 4 y 21 de Abril del año 2014, con lo cual se pretende mostrar el comportamiento de la irradiación solar para diferentes días en Quibdó, donde se puede observar que para el día 4 de abril de 2014, el promedio de irradiancia fue aproximadamente de  $300,85 \text{ W/m}^2$ . Además su irradiancia máxima la alcanzó a las 12 horas del mediodía con un aproximado de  $838 \text{ W/m}^2$  y su irradiancia mínima de  $0,049 \text{ W/m}^2$ , la cual se presentó a las 6 de las mañana. Para el día 21 de abril el promedio de irradiancia fue aproximadamente de  $280,2 \text{ W/m}^2$ , con una irradiancia máxima de  $648,6 \text{ W/m}^2$  la cual fue alcanzada a las 13 horas del día y la irradiancia mínima fue de  $0,48 \text{ W/m}^2$ , la cual se presentó a las 6 de las mañana. Por lo anterior podemos afirmar que la irradiancia Quibdó presenta un comportamiento monomodal ya que el pico de irradiancia se puede dar entre las 12m y las 13 horas.

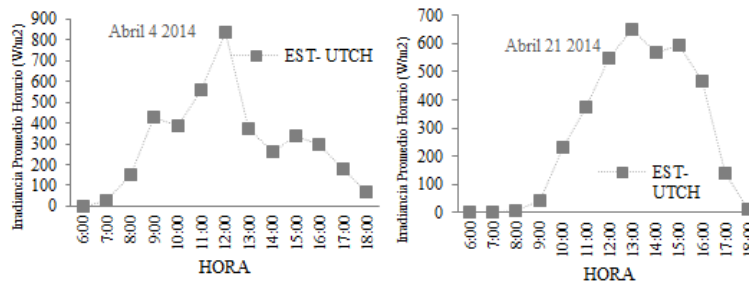
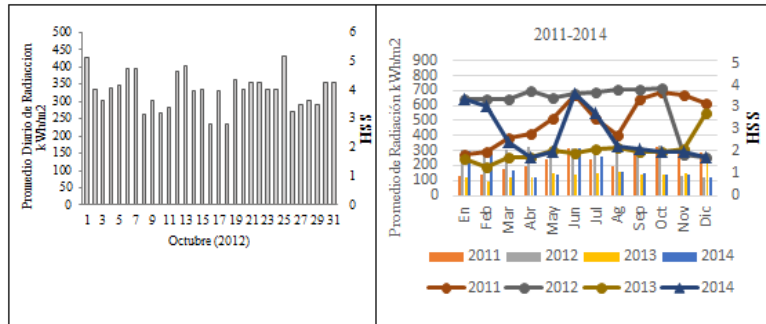


Figura 4. Perfiles diarios de radiación solar tomados con la Estación - UTCH.

En la figura 5, se presentan los resultados del promedio diario de radiación solar global medida para el mes de Octubre del 2012 escogido a manera de ejemplo. Análogamente, se hace el análisis estadístico descriptivo por año, lo cual permite obtener series de tiempo mes para la radiación solar en  $\text{kWh/m}^2$ . La figura 5, resume también los resultados de este proceso para cuatro años entre 2011 y 2014.

Los resultados anteriores muestran un comportamiento periódico de la radiación solar global a lo largo del año, por efectos astronómicos y meteorológicos. Se observa que los meses de mayor radiación solar en Quibdó son Junio y Julio durante los cuales se alcanzan valores superiores a  $3,83 \text{ kWh/m}^2$  y los de menor radiación solar son Abril, Agosto y Noviembre, en los cuales la radiación promedio diaria es alrededor de  $1,59 \text{ kWh/m}^2$ . Estos resultados revelaron también que los promedios diarios anuales de radiación solar en Quibdó durante el 2011 y el 2012 fueron de  $2,85 \text{ kWh/m}^2$  y  $3,41 \text{ kWh/m}^2$ , mientras que para el 2013 es de  $1.73 \text{ kWh/m}^2$  y de  $2,30 \text{ kWh/m}^2$  para el 2014.

GENERACIÓN FOTOVOLTAICA QUIBDÓ



**Figura 5.** Promedio diario de radiación solar para el mes de Octubre de 2012. Promedios diarios mensuales de radiación solar, durante los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

En la figura 6, se resumen los valores calculados para los principales parámetros que describen el comportamiento estadístico mensual de la radiación solar para los cuatro años estudiados.

Como se observa en la figura 6, la varianza más alta corresponde al año 2011, con un valor de 1,3 kWh/m<sup>2</sup>, lo cual nos indica que en ese año se presentó la mayor variabilidad o dispersión en los valores mensuales de la radiación solar para Quibdó. La menor dispersión en la radiación solar se presentó en al año 2013 con un valor de 0,54 kWh/m<sup>2</sup>, para el cual la radiación total fue de 20,76 kWh/m<sup>2</sup>.

Estadísticas Descriptivas (kWh/m <sup>2</sup> )	2011	2012	2013	2014
Suma	1039,81	1248,52	638,59	836,68
Mediana	2,81	3,50	1,74	1,98
Varianza	1,30	1,15	0,54	1,20
Desviación St.	1,14	1,07	0,73	1,10
Mínimo	0,10	0,34	0,04	0,29
Máximo	5,84	5,49	5,69	5,75
Rango	5,74	5,15	5,69	5,45
Suma de valores medios	34,21	40,93	20,76	27,60

**Figura 6.** Parámetros que describen el comportamiento estadístico mensual de la radiación solar para los cuatro años analizados.

El promedio acumulado de los valores de radiación promedio diaria mensual en los cuatro años, da como resultado 2,51 kWh/m<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 0,70 kWh/m<sup>2</sup>. Esto representa un rango de ±27,88% de desviación en los

promedios. Estos resultados demuestran que el promedio de radiación solar, medida localmente, está en el intervalo entre  $1,81 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{Rad.} \leq 3,21 \text{ kWh/m}^2$ , lo cual representa una alta probabilidad para los valores de irradiancia promedio medidos y para los que el rango de  $\pm 27,88\%$  del valor promedio son de alta precisión.

Es importante aclarar que aunque se han tenido en cuenta las diferentes causas de error y las dificultades concernientes al tratamiento estadístico de los datos, así como la incertidumbre del instrumento de medición (en general derivada por la precisión del piranómetro y los diferentes componentes en hardware y software aplicados, que contempla el instrumento virtual desarrollado), también se debe tener en cuenta la naturaleza aleatoria del comportamiento de la radiación solar, la cual fluctúa en forma drástica estadísticamente. Por esta razón, es de mayor relevancia un análisis estadístico representativo de los datos, en términos de “intervalos de confianza” para los valores promedios de radiación obtenidos y tiene más significado si se analiza la evolución de estos valores con base en series de tiempo. Aunque cuatro años, es una muestra restringida en el acumulado, el analizar mes por mes a lo largo de los años, da un mayor nivel de confianza en las medidas de irradiancia solar global.

Conforme a los resultados presentados en la figura 5, se han tomado los meses de Octubre (por presentar alta radiación solar promedio diaria mensual) y Noviembre (por presentar baja irradiancia solar promedio diaria mensual) como meses representativos para un análisis estadístico descriptivo por mes; con un 95% de intervalo de confianza en las medidas, correspondientes a los meses de Octubre y Noviembre respectivamente, de los años 2011 a 2014.

En el caso tomado para Octubre,  $\sigma = 1,11 \text{ kWh/m}^2$ , así que  $\pm 2\sigma$  representa  $\pm 80\%$  del valor promedio; esto da un error porcentual del  $\pm 80\%$  del valor promedio mensual, lo cual corresponde a un intervalo de confianza del 95%, el rango tan amplio del error porcentual es debido a los parámetros  $a$  y  $b$  utilizados en el modelo de ARMSTRONG, ya que por razones de correlación generan mayores variabilidades en los datos. De esta forma se puede establecer a manera de predicción, que el estado de radiación solar promedio diaria para los meses de Octubre próximos estará en el intervalo:

$$1,69 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{RAD} \leq 3,91 \text{ kWh/m}^2$$

Por tanto se puede afirmar que para los meses de Octubre la radiación solar promedio diaria, es igual a  $2,80 \text{ kWh/m}^2 \pm 80\%$ .

Análogamente para los meses de abril,  $\sigma = 0,97 \text{ kWh/m}^2$ , por tanto para  $\pm 2\sigma$  se tiene  $\pm 84\%$  del valor promedio mensual, luego el intervalo está dado por:

$$1,33 \text{ kWh/m}^2 \leq \text{RAD} \leq 3,63 \text{ kWh/m}^2$$

Luego el estado de radiación solar global promedio diaria para los meses de abril, es igual a  $2,30 \text{ kWh/m}^2 \pm 84\%$ . La figura 7, resume los parámetros de incertidumbre para las medidas de los promedios diarios mensuales de radiación solar en la ciudad de Quibdó. Se incluye la desviación estándar  $\sigma$  y el porcentaje de  $2\sigma/\text{RAD}$ .



GENERACIÓN FOTOVOLTAICA QUIBDÓ

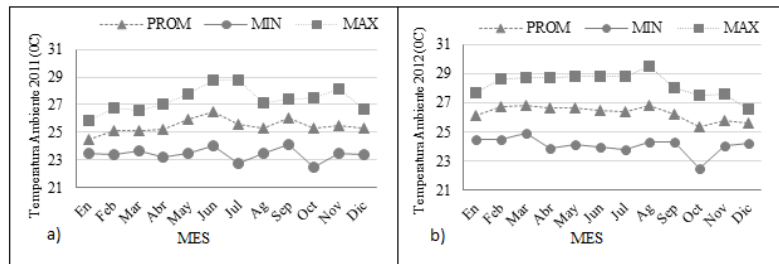
	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	PROM
<b>RAD</b>	2,55	2,44	2,33	2,30	2,48	3,25	2,90	2,49	2,75	2,80	2,21	2,38	<b>2,573</b>
$\sigma$	1,06	1,06	0,79	0,97	0,83	0,92	0,73	0,87	1,02	1,11	0,90	0,90	<b>0,930</b>
<b>2<math>\sigma</math>/RAD</b>	83,08	86,82	67,54	84,46	66,67	56,55	50,32	69,81	74,13	79,55	81,65	75,60	<b>73,014</b>

**Figura 7.** Parámetros de incertidumbre del promedio diario mensual de radiación solar para la ciudad de Quibdó.

**3.2. Análisis estadístico descriptivo de los datos de temperatura ambiente**

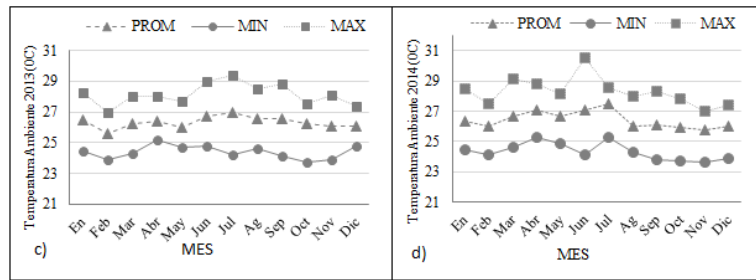
El análisis estadístico descriptivo para los datos de temperatura registrados en la base de datos generada, es análogo al realizado para la radiación solar.

La temperatura (Figuras 8 y 9) durante los 4 años analizados muestra un comportamiento bastante igual en cuanto a la incidencia en esta zona, donde se puede observar que su temperatura está dada para un mínimo de 22 a 24 °C y un máximo de 27 a 32 °C, lo cual está dentro de los parámetros estándar de funcionamiento de cualquier tipo de generador solar.



**Figura 8.** Promedios diarios mensuales de temperaturas ambiente y correspondientes valores de temperaturas máximas y mínimas medidos para los años 2011 a 2014.

Con los datos de los promedios de temperaturas registrados en la base de datos, se obtuvo una media general para la temperatura ambiente medida en las cercanías del Departamento de licenciatura en Matemáticas y Física de 26,1 °C, con una desviación estándar  $\sigma$  de  $\pm 0,4$  °C. Esto significa que el rango de variación de la temperatura media diaria del sector, estimada con un intervalo de confianza del 95 %, es de:  $25,7$  °C  $\leq T \leq 26,5$  °C. Por tanto, se puede concluir que la temperatura media diaria obtenida a partir de las medidas hechas en los últimos tres años es de  $T = 26,1$  °C  $\pm 0,4$  %.



**Figura 9.** Promedios diarios mensuales de temperaturas ambiente y correspondientes valores de temperaturas máximas y mínimas medidos para los años 2011 a 2014.

#### 4. Factibilidad del uso de generación eléctrica fotovoltaica

El análisis de la factibilidad de generación de energía eléctrica realizado con la herramienta RETScreen, tuvo en consideración dos ciudades de Colombia (Quibdó y Bogotá) y una ciudad de Alemania (Berlín/Dahlem) (debido a que este país es pionero a nivel mundial en energía solar fv). La herramienta RETScreen cuenta con diferentes parámetros financieros y técnicos que permiten evaluar la viabilidad en implementación de proyectos con energía renovable. Para nuestro caso del análisis se utilizó el método 1 (Pre-Factibilidad) en red central. Entre los parámetros financieros se cuenta con la tarifa de exportación a la red, tasa de inflación, incentivos y donaciones, que difieren de un país a otro según figura 10.

Alemania es un país fuerte en energía renovable por lo que han desarrollado políticas que hacen viable su implementación, para la promoción de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovables). En la mayoría de los países del mundo se utilizan instrumentos que propician, facilitan y procuran mantener las condiciones en estos proyectos; los instrumentos en mención son: impuesto al carbono, topes de emisiones que están incluidos dentro los instrumentos para las reducciones, el *Feed-In Tariff* (FIT), cuotas, subastas, certificados de energías renovables (REC), *Contract for Difference* (CFD) que se encuentran incluidos dentro de los esquemas de mercado. Para el caso de Alemania, los instrumentos que fomentan las FNCER son el FIT y CFD; el FIT en Alemania garantiza una tarifa de exportación como se refleja en la figura 10, los CFD garantizan un precio por un periodo de tiempo casi similar al FIT. Por lo tanto se escogió el precio de FIT para la evaluación del sistema FV expuesto en la parte técnica de este apartado y una tasa de inflación de 0.187%.

En Colombia a partir del año 2014 se han establecido mecanismos de apoyo para las FNCER que aún están en proceso de reglamentación con la expedición de la ley 1715 de 2014. Cabe mencionar la posibilidad de auto generadores para entregar sus excedentes a la red y sus reconocimientos como créditos de energía (medición bidireccional) para el caso de proyectos de pequeña escala, la creación de un fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía,

GENERACIÓN FOTOVOLTAICA QUIBDÓ

Parámetros Financieros		
	COLOMBIA	ALEMANIA
Tarifa de exportación a la red	NO DEFINIDA	0.14 \$ USD/kW
Tasa de inflación	2.5%	0.187%
Instrumentos de Incentivos y donaciones (FNCER)	NO DEFINIDO	Feed- In tariff Contract for difference

Figura 10. Descripción de parámetros financieros.

destinados a financiar programas y proyectos en dichas áreas y la disposición de incentivos fiscales explícitos: posibilidad de deducir de la renta gravable hasta el 50 % de la inversión con FNCER, exención arancelaria, depreciación acelerada, entre otros.

Lo anterior nos lleva a fijar una tarifa de exportación teniendo en cuenta la tarifa de exportación actual a la red del sistema energético Colombiano de 126 USD/MWh sin ningún tipo de incentivos y una tasa de inflación de 2.4 %. Los parámetros técnicos, se establecieron de acuerdo a una demanda dada de 4.92 kWh y el diseño del sistema fotovoltaico como se muestra en la figura 11.

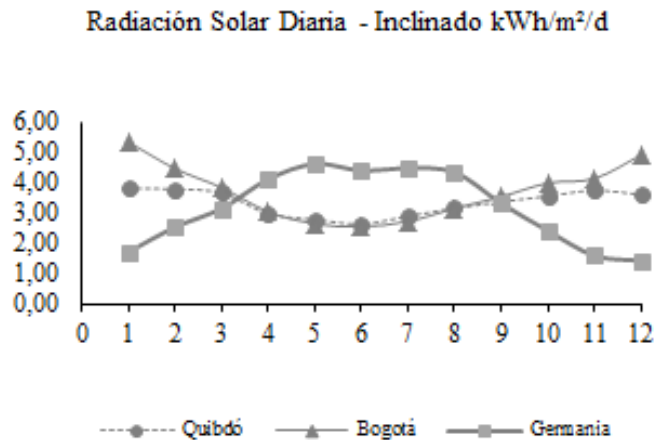
Parámetros Técnicos	
Tipo de Paneles a Emplear	Poli Silicio
Capacidad de generación eléctrica por unidad	300W
Fabricante	Canadian Solar
Modelo	poliSi - CS6X-300P - MaxPower
Eficiencia	15.60%
Temperatura normal de operación de las celdas	45°C
Coefficiente de temperatura	0.40%
Cantidad de Módulos Solares	20
Capacidad de generación eléctrica	6kW
Inversor	SMA SUNY BOY 5kW
Eficiencia del Inversor	90%
Capacidad	5kW
Perdidas Varias	10%

Figura 11. Descripción de parámetros técnicos del sistema fotovoltaico empleado.

De acuerdo a RETScreen, en la comparación de la viabilidad en la generación de energía eléctrica tanto en Colombia como en Alemania; es importante mencionar que ambos presentan comportamientos variados en cuanto a radiación

solar. En Colombia se cuenta con un máximo de radiación para Quibdó de 3.80 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de Enero y un mínimo de 2.64 kWh/m<sup>2</sup> para Junio y en Bogotá un máximo de 5.35 kWh/m<sup>2</sup> para el mes de enero y un mínimo de 2.55 kWh/m<sup>2</sup>, mostrando comportamientos similares en cuanto a los meses de mayor y menor radiación.

Alemania (Berlín/Dahlem) registra valores de radiación máxima de 4.63 kWh/m<sup>2</sup> en Mayo y una mínima de 1.43 kWh/m<sup>2</sup> para Diciembre (Figura 12).

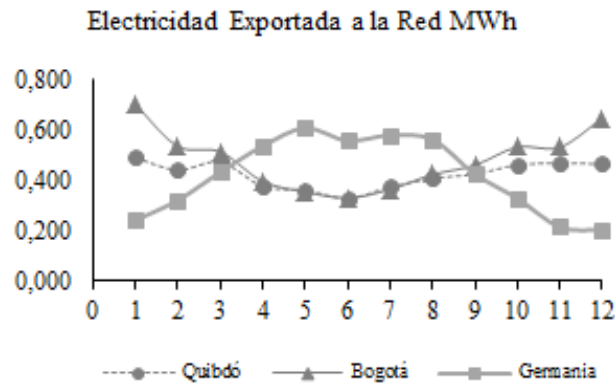


**Figura 12.** Comparación de la radiación solar entre dos ciudades de Colombia y una de Alemania, mediante la herramienta RETScreen.

En cuanto a la generación de energía eléctrica se aprecia que a partir de la radiación (Figura 12) y con el mismo sistema fotovoltaico diseñado (Figura 11) para cubrir la demanda de 4,92 MWh/año, se obtienen valores para Quibdó de 5,072 MWh/año, para Bogotá de 5,75 MWh/año y para Alemania (Berlín/Dahlem) 5,01 MWh/año. Según la herramienta RETScreen tanto Bogotá como Quibdó, cuentan con mayores posibilidades en cuanto a la generación de energía eléctrica a través del empleo de sistemas solares fotovoltaicos dado a que presenta mejores condiciones de radiación solar que Alemania.

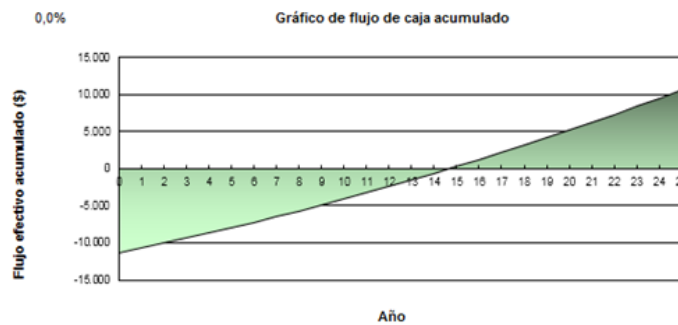
Tanto Colombia como Alemania presentan parámetros financieros con valores distintos, lo que hace que los proyectos de generación con tecnología renovable sean más viables. Tal es el caso de Alemania que cuenta con incentivos para la implementación de proyectos que disminuyan la carga contaminante de CO<sub>2</sub> en el ambiente. Las siguientes figuras muestran los tiempos en que se puede recuperar la inversión (repago) realizado en la implantación del sistema fotovoltaico planteado en la (Figura 11) para la ciudad de Quibdó, Bogotá y Alemania (Berlín/Dahlem) y que además lograría una reducción anual de 0.9t CO<sub>2</sub> Equivalente a 0.2 autos y camiones no utilizados.

GENERACIÓN FOTOVOLTAICA QUIBDÓ



**Figura 13.** Comparación de la electricidad exportada a la red entre dos ciudades de Colombia y una de Alemania, mediante la herramienta RETScreen.

La figura 14 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Quibdó, se logra una tasa interna de retorno del 5.3 % y un periodo de repago de capital en 14.7 años; condiciones que son favorables para un proyecto con un periodo de vida de 25 años. La gráfica 15 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Bogotá, se logra una tasa interna de retorno del 6.5 % y un periodo de repago de capital en 13.1 años; condiciones que son igualmente favorables. Finalmente, la gráfica 16 muestra que para un proyecto en las condiciones antes mencionadas en la ciudad de Berlín, se logra una tasa interna de retorno del 3.8 % y un periodo de repago de capital en 16 años; condiciones que también son favorables.



**Figura 14.** Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Quibdó – RETScreen.

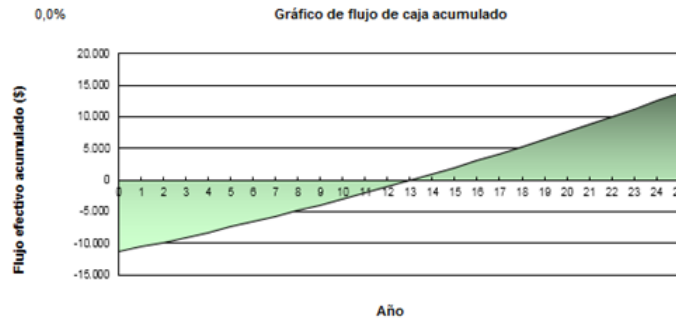


Figura 15. Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Bogotá – RETScreen.

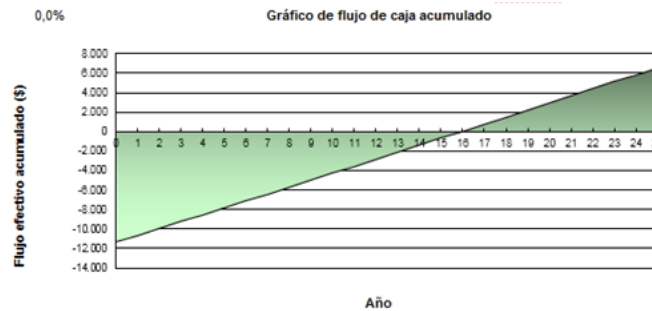


Figura 16. Flujo efectivo acumulado para la ciudad de Berlín – RETScreen.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis descriptivo de las variables de radiación solar y temperatura ambiente para la ciudad de Quibdó; cuyos resultados obtenidos muestran las características típicas para estas zonas tropicales. La radiación presenta comportamientos periódicos parametrizados por ciertas condiciones climáticas propias de la región. Se concluye que el pico máximo de la curva del perfil diario de la radiación solar está dado entre las 12m y las 13pm. El promedio de la radiación para los años de estudios en este trabajo es de 2.573 kWh/m<sup>2</sup>.

La temperatura presenta un comportamiento regular en cuanto a máximos y mínimos presentes en todos los meses del año. Se determinó que en la región se registran temperaturas máximas entre 27 y 31 °C y temperaturas mínimas entre 22 y 23 °C.

La implementación de un sistema fotovoltaico con las características establecidas es viable, gracias a que la recuperación de la inversión se alcanza antes del tiempo de vida del proyecto; tanto en Alemania como en Colombia y en específico para la ciudad de Quibdó. Si en Colombia existiese el mismo escenario

de regulación en la venta de electricidad que existe en Alemania, la generación por energía renovable podría presentar mayores crecimientos.

## Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo brindado por la Gobernación del Chocó en el marco de la convocatoria 694 “Formación de capital humano de alto nivel” y el apoyo del grupo de investigación en Energía Renovable y Meteorología de la Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, liderado por el Msc. William Murillo López.

## Referencias

1. Ponoum, R., Rutberg, M., & Bouza, A. (2013). Energy storage for pv power. *ASHRAE Journal*, 55 (11): 80 - 53.
2. Pabón, J., Palomino, R., & Murillo, W. (2005). Sobre el Régimen diario de las variables climatológicas en el Municipio de Quibdó. *Meteorología Colombiana*, 9:59-66.
3. Lee, K., Lee, D., Baek, N., Kwon H., & Lee, C. (2012). Preliminary Determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen. *Energy*, 47 (1): 83 - 96.
4. Murillo, W., Valois, G., & Aragón, G. (2008). Medición y estimación de la radiación solar en Quibdó. *La imprenta imaginaria*. Valencia-España, pp 178.
5. Vélez, A., Vergara, E., Barraza, W., & Agudelo, D. (2013). Determinación de un modelo paramétrica para estimar la radiación Solar. *Ingenium*, 7 (18): 11 - 17.
6. Troccoli, A., & Morcrette, J-J. (2014). Skill of direct solar Radiation predicted by the ECMWF Global atmospheric model over Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53 (11): 2571 - 2588.
7. Hernández, J., Sáenz, E., & Vallejo, W. (2010). Estudio del Recurso Solar en la ciudad de Bogotá para el diseño de sistemas Fotovoltaicos interconectados residenciales. *Revista Colombiana de Física*, 42 (2): 161 - 165.
8. Campoccia, A., Dusonchet, L., Telaretti, E., & Zizzo, G. (2009). Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. *Solar Energy*, 83(3): 287-297.
9. Cheng, C. L., Jiménez, C. S. S., & Lee, M. C. (2009). Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy*, 34(6): 1644-1650.







## Coeficiente de actividad de $C_{16}E_{20}$ en solución acuosa a 25 °C a partir de Equilibrio Solución-Superficie (ESS)

### $C_{16}E_{20}$ Activity Coefficient in Watery Solutions at 25 °C from the Surface Balance Solution

Julio Alberto Clavijo Penagos<sup>1,2\*</sup>, Jesús Gracia Fadrique<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Investigaciones Básicas, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá

<sup>2</sup> Laboratorio de superficies, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

FECHA DE ENTREGA: 18 DE FEBRERO DE 2016

FECHA DE EVALUACIÓN: 18 DE MARZO DE 2016

FECHA DE APROBACIÓN: 19 DE ABRIL DE 2016

**Resumen** En este trabajo se presentan resultados de tensión superficial de soluciones acuosas del tensoactivo no iónico de tipo etoxilado Polioxietilén (20) Cetil éter (alcohol cetílico etoxilado con 20 moles de óxido de etileno,  $C_{16}E_{20}$ , Brij 58) a 25 °C a varias concentraciones, obtenidos mediante el método del anillo de DuNoüy, así como de concentración micelar crítica (CMC) y de coeficiente de actividad a dilución infinita obtenidos mediante equilibrio solución superficie a la misma temperatura. Los resultados se discuten en términos de la idealidad de la solución a las distintas concentraciones trabajadas y se comparan con otros valores reportados en la literatura, y se discute sobre la utilidad del equilibrio solución superficie para la determinación de coeficientes de actividad a dilución infinita.

**Abstract** This document presents the results of superficial tension of non-ionic tensoactive watery solutions of the type polyoxyethylene ethoxylated (20) cetyl ether (cetyl ethoxylated alcohol with 20 moles of ethylene oxide,  $C_{16}E_{20}$ , Brij 58) at 25 °C at various concentrations, obtained through the DuNoüy ring, as well as critical micelle concentration (CMC) and coefficient of infinite dilution activity obtained through surface balance solution at the same temperature. The results are discussed with respect to the ideal solution regarding the concentrations used. We also compare other values reported in the literature and we discuss the utility of the surface balance solution to determine activity coefficients at infinite dilution.

**Palabras Clave:** aro de DuNoüy,  $C_{16}E_{20}$ , coeficientes de actividad, dilución de actividad infinita

\* [jaclavijop@gmail.com](mailto:jaclavijop@gmail.com)

**Keywords:** DuNoüy ring, C16E20, activity coefficients, infinite dilution activity

## 1. Introducción

Los tensoactivos no iónicos son compuestos bien conocidos, y de gran importancia para la industria y la comunidad de la ciencia de superficies e ingeniería química. Es bien sabido que la mayoría de las mezclas que presenta el fenómeno conocido como mínima temperatura crítica de solución (Low critical Solution temperature LCST) incluyen agua en sus componentes [1,2] y tensoactivos no iónicos tales como 2 - butoxietanol como solutos [3]. Si bien se puede encontrar en la literatura una gran variedad de estudios para muchas propiedades físico-químicas y termodinámicas de soluciones acuosas de solutos tensoactivo no iónico, especialmente en relación con los coeficientes de actividad y superficie-solución de equilibrio [4,5,6,7,8], los valores que se encuentran en la literatura para las propiedades superficiales de las soluciones acuosas de este tipo de solutos no presentan buen acuerdo entre sí, quizás debido a la muy alta actividad superficial del  $C_{16}E_{20}$  en agua y a la sensibilidad de los métodos usados para la determinación de la tensión superficial; los valores de CMC en fracción molar para el  $C_{16}E_{20}$  en agua a temperatura ambiente oscilan entre  $x_{CMC} = 5.1 \times 10^{-8}$  [9] y  $1.4 \times 10^{-6}$  [10]. Asimismo, teniendo en cuenta la gran utilidad que el coeficiente de actividad a dilución infinita del soluto  $\gamma_2^\infty$  en agua presenta para la ingeniería química, el conocimiento preciso de esta propiedad es de suma importancia en cualquier solución acuosa. Dado que la práctica general para la determinación del valor de  $\gamma_2^\infty$  en agua es la utilización de equilibrio líquido-vapor, es conocida la gran dificultad que impone el estado sólido de los tensoactivos no iónicos de tipo etoxilado para la determinación de sus valores de  $\gamma_2^\infty$  en agua al poseer una presión de vapor despreciable con respecto a la del solvente.

Por todo lo anterior, una determinación precisa de la variación de la tensión superficial de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  y del valor tanto de CMC como del coeficiente de actividad a dilución infinita del soluto es de gran interés. Este trabajo presenta los resultados de tensión superficial de soluciones acuosas del tensoactivo no iónico de tipo etoxilado Polioxietilén (20) Cetil éter ( $C_{16}E_{20}$ , Brij 58) a 25 °C a varias concentraciones, obtenidos mediante el método del anillo, así como de concentración micelar crítica (CMC) y de coeficiente de actividad a dilución infinita obtenidos mediante equilibrio solución superficie a la misma temperatura, así como una discusión sobre la conveniencia del uso del equilibrio solución superficie para la determinación de los valores de CMC de este tipo de solutos.

En la literatura está bien establecida la teoría para determinar el valor de  $\gamma_2^\infty$  para el soluto dado que el mismo tenga actividad superficial [11]. A partir de la ecuación de estado bidimensional más simple, la Ecuación de Volmer

$$\pi(A - A_0) = RT \quad (1)$$

COEFICIENTE DE ACTIVIDAD DE  $C_{16}E_{20}$

Se puede escribir

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{RT}{\pi} + \frac{1}{\Gamma_0} \quad (2)$$

Siendo el valor de la adsorción relativa cuando la superficie está saturada con soluto. Al reemplazar  $\Gamma$  en la isoterma de adsorción de Gibbs,  $d\pi = \Gamma d\mu$ , y tras integrar entre límites adecuados, se obtiene el potencial químico de superficie

$$\mu_2^s = \mu_2^{0,s} + RT \ln(\pi^*) - \frac{\pi^0 - \pi}{\Gamma_0} \quad (3)$$

Donde  $\mu_2^{0,s}$  corresponde al potencial químico superficial de referencia,  $\pi^0 = \sigma_1 - \sigma_2$ , y  $\pi^* = \pi/\pi_0$  es la presión superficial reducida. Esto implica que el estado estándar para el potencial químico superficial del componente 2 está descrito por  $\pi = \pi_0$ , lo cual corresponde a una superficie saturada con el componente 2. De otra parte, el potencial químico para el componente 2 en el interior de la solución (bulto, b) está dado por

$$\mu_2^b = \mu_2^{0,b} + RT \ln(\gamma_2) + RT \ln(x_2) \quad (4)$$

Donde  $x_2$  y  $\gamma_2$  son la fracción mol del componente 2 y su coeficiente de actividad (bajo la convención simétrica, es decir, definido en referencia a una mezcla ideal en el sentido de la Ley de Raoult) respectivamente. En condiciones de equilibrio entre solución y superficie, y escogiendo el mismo estado de referencia ( $x_2 = 1$ ) para ambos, se puede escribir

$$RT \ln(\gamma_2 x_2) = RT \ln \pi^* - \frac{\pi^0 - \pi}{\Gamma_0} \quad (5)$$

Y reordenando, se obtiene

$$\ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right) = \frac{\pi^0 - \pi}{\Gamma_0 RT} + \ln \gamma_2 \quad (6)$$

Y al reemplazar  $\ln \gamma_2$  por una función adecuada en  $x_2$ , tal como la Ecuación de Margules de tres sufijos, se obtiene

$$\ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right) = \frac{\pi^0}{\Gamma_0 RT} (1 - \pi^*) + (\alpha + 2\beta x_2)(1 - x_2)^2 \quad (7)$$

Donde  $\alpha = \ln \gamma_2^\infty$ , y  $\alpha + \beta = \ln \gamma_1^\infty$ . Los tres parámetros de la ecuación (7) ( $\pi^0/\Gamma_0 RT$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) se pueden obtener mediante ajuste no lineal la ecuación (7) con datos experimentales de alta calidad.

Para obtener la relación entre  $\Gamma_2^\infty$  y  $x_{CMC}$ , y siguiendo lo reportado en la literatura [12], a dilución infinita, la ecuación (3) se puede escribir

$$\lim_{\pi \rightarrow 0} \mu_2^s = \mu_2^{0,s} + RT \ln \pi^* - \frac{\pi_0}{\Gamma_0} \quad (8)$$

El potencial químico del bulto a dilución infinita es

$$\lim_{\pi \rightarrow 0} \mu_2^s = \mu_2^{0,b} + RT \ln(\gamma_2^\infty) + RT \ln(x_2) \quad (9)$$

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

Combinando las ecuaciones (8) y (9), se obtiene

$$\ln \gamma_2^\infty = \ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right)_{x_2 \rightarrow 0} - \frac{\pi_0}{\Gamma_0 RT} \quad (10)$$

Ahora, a través de la igualdad de potenciales químicos en el bulto y en la superficie  $d\mu^s = d\mu^b$ , se obtiene

$$d \ln \left( \frac{\pi}{x_2} \right) = - \frac{d\pi}{\Gamma_0 RT} \quad (11)$$

Y al integrar, se llega a versión integral de la Ecuación de Estado Superficial (EES) de Volmer:

$$\ln \left( \frac{\pi}{x_2} \right) = \ln \left( \frac{\pi}{x_2} \right)_{x_2 \rightarrow 0} - \frac{\pi}{\Gamma_0 RT} \quad (12)$$

Y expresando la ecuación (??) en términos de la presión reducida, se llega a que

$$\ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right) = \ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right)_{x_2 \rightarrow 0} - \frac{\pi}{\Gamma_0 RT} \quad (13)$$

La aplicación de la ecuación (??) a un tensoactivo en solución acuosa cuando  $x = X_{CMC}$ ,  $\pi = \pi^0 = \pi_m$ ,  $\Gamma_0 = \Gamma_m$  y  $\pi^* = 1$  permite escribir que

$$- \ln X_{CMC} = \ln \left( \frac{\pi^*}{x_2} \right)_{x_2 \rightarrow 0} - \frac{\pi_m}{\Gamma_m RT} \quad (14)$$

Comparando las ecuaciones (10) y (14), se llega a que

$$\ln \gamma_2^\infty = \ln x_{CMC} \quad (15)$$

Y, finalmente,

$$\gamma_2^\infty = x_{CMC}^{-1} \quad (16)$$

Entonces, si el valor de  $x_{CMC}$  se conoce, se puede conocer el valor del  $\gamma_2^\infty$  para el tensoactivo. Sin embargo, si los datos experimentales no son de alta calidad (como lo requiere la ecuación (7) para una buena determinación del valor de  $\gamma_2^\infty$ ) o no se comportan según las ecuaciones anteriores, se ha de encontrar el valor de  $x_{CMC}$  mediante otra vía, para así poder aplicar la ecuación anterior para obtener el valor de  $x_{CMC}$  para el tensoactivo no iónico etoxilado, en el caso de este trabajo.

Para conocer el valor de  $x_{CMC}$  en este trabajo, a partir de la ecuación de adsorción de Gibbs escrita en la forma  $d\pi = \Gamma_1 d\mu_1 + \Gamma_2 d\mu_2$ , y teniendo en cuenta que si  $x = x_{CMC}$ ,  $\Gamma_1 = 0$ ,  $\Gamma_2 = \Gamma_s$  y  $\mu = \mu_m = \mu_s$ ,  $d\pi = \Gamma_s d\mu_2$ , se llega a que

$$d\pi = \Gamma_s RT d \ln x \quad (17)$$

E integrando entre  $\pi$  y  $\pi_s$  y  $x$  y  $x_{CMC}$ , se llega a que

$$\pi = (\pi_s - \Gamma_s RT \ln x_{CMC}) + \Gamma_s RT \ln x \quad (18)$$

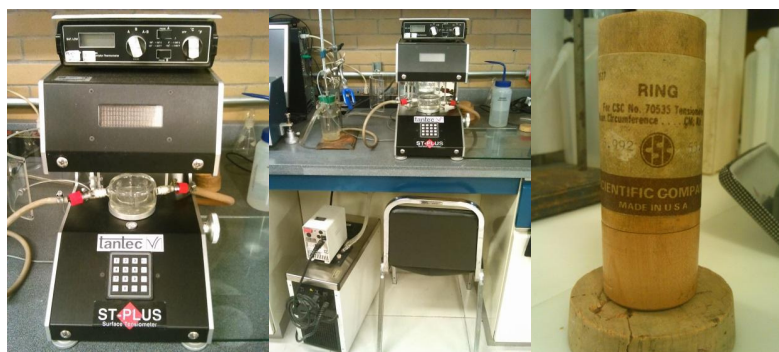
COEFICIENTE DE ACTIVIDAD DE  $C_{16}E_{20}$

La ecuación (18) indica que una gráfica de  $\pi$  contra  $\ln x$  en la región de la CMC se comporta como una línea recta de cuya pendiente se puede obtener  $\Gamma_s RT$  y de cuya ordenada al origen se puede obtener  $\ln x_{CMC}$ .

De esta forma, a través de equilibrio solución-superficie, se puede establecer el valor tanto de  $x_{CMC}$  como de  $\gamma_2^\infty$ , y así, discutir sobre la naturaleza de la solución acuosa cuando el tensoactivo es de tipo no iónico etoxilado.

Constante	$a$	$b$	$C$	$D^*$	$d^*$	$R$	$F$
Valor	0.725	0.0009075	0.0140154	0.997048	0.00082	0.9537 cm	0.9368

**Cuadro 1.** Valores de las constantes usadas en las determinaciones experimentales a través del método del anillo de DuNoüy.



**Figura 1.** Montaje experimental para la determinación de la tensión superficial de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  por el método del anillo de DuNoüy. A la izquierda se observa el detalle del tensiómetro Tanteq ST-PLUS Surface Tensiometer con la celda de medida; al centro, se observa el baño termostatado ThermoHaake DC 30, y a la derecha, el empaque del anillo de platino usado en las determinaciones.

## 2. Experimental

Las determinaciones de tensión superficial de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  se realizaron mediante el método del anillo de DuNoüy, tal como está suficientemente ilustrada, tanto la técnica experimental como el procedimiento de cálculo, en la literatura [13]. El equipo usado para las mediciones fue un tensiómetro marca Tanteq ST-PLUS *Surface Tensiometer* acoplado a un baño termostatado marca

ThermoHaake DC 30 con control de temperatura de precisión de  $\pm 0.1$  °C. El montaje se ilustra en la Figura 1.

Se usó un anillo de platino marca CSC Scientific Company, Inc., con un valor de circunferencia promedio de 5.992 cm y un valor de  $R/r = 53.6$ ; De esta forma, el valor de la tensión superficial tanto del agua pura como de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  se obtuvo mediante la ecuación

$$\sigma = \frac{mg}{4\pi R} F \quad (19)$$

En donde es el peso en gramos del líquido que el anillo eleva sobre la superficie del resto del líquido,  $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad ( $977.94 \text{ cm s}^{-2}$  en la UNAM),  $R$  es el radio promedio del anillo y  $F$  es el factor de corrección que se obtiene mediante la ecuación

$$(F - a)^2 = \left( \frac{4b}{\pi^2} \frac{1}{R^2} \right) \left( \frac{P}{D - d} \right) + C \quad (20)$$

En la cual  $D - d$  es la diferencia entre las densidades de la solución (o del solvente puro) y del vapor sobre el líquido,  $a$ ,  $b$  y  $C$  son constantes de ajuste, y  $R$  es el radio del anillo. Los valores de las constantes antes descritas se presentan en Cuadro 1. Como se observa en la ecuación 20, la densidad del líquido es necesaria para el cálculo del valor de la tensión superficial. Las densidades del agua pura y de las distintas soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  estudiadas en este trabajo fueron determinadas por medio de un densímetro de Tubo Vibrante Anton Parr DMA 4500 M, el cual tiene un control de temperatura con precisión de  $\pm 0.01$  °C; sin embargo, se encontró que las densidades de las soluciones acuosas a 25 °C no difieren de la del agua pura en grado significativo dentro de la incertidumbre experimental.

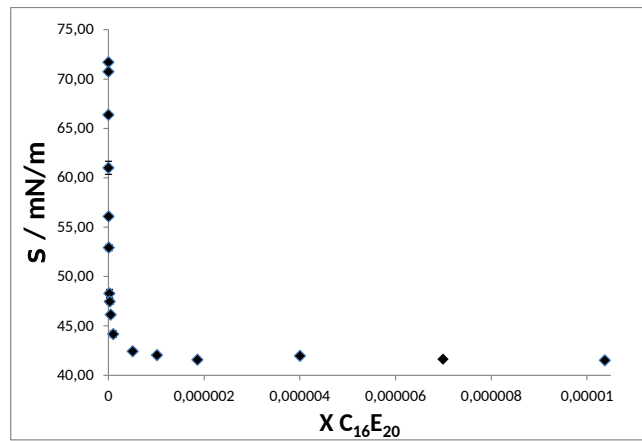
El tensoactivo no iónico etoxilado  $C_{16}E_{20}$  (CAS 9004-95-9) fue suministrado por Sigma, y se usó sin purificación adicional. Todas las soluciones acuosas se preparan por pesada en una balanza digital marca Shimadzu AW220 con precisión de  $\pm 0.1$  mg y usando agua destilada de alta calidad, lo cual se nota al observar el valor de la tensión superficial del agua pura a 25 °C obtenido en este trabajo y reportado en el Cuadro 1 ( $71.69 \pm 0.02$  mN/m) en comparación con el valor de literatura tomado como referencia en este trabajo ( $71.99 \pm 0.36$  mN/m [14]). De esta forma, se obtuvieron los resultados de tensión superficial del agua pura y de varias soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  a 25 °C que se reportan y se discuten en este estudio.

### 3. Resultados y discusión

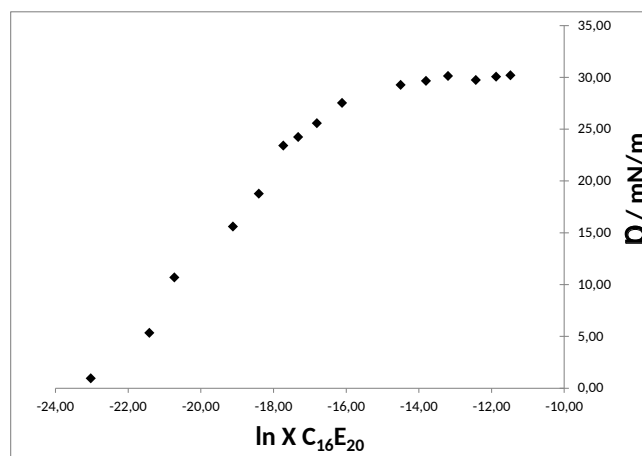
En el Cuadro 2 y en la Figura 3 se presentan los resultados de tensión superficial de las soluciones acuosas del tensoactivo no iónico  $C_{16}E_{20}$  a 25 °C. Observando dichos resultados, se nota que el  $C_{16}E_{20}$  es un compuesto de alta actividad superficial; a concentración tan baja como  $9 \times 10^{-10}$  en fracción mol del soluto,  $\sigma$  ya muestra un descenso de más de 10 mN/m con respecto al valor para el

COEFICIENTE DE ACTIVIDAD DE  $C_{16}E_{20}$

agua pura ( $71.69 \pm 0.02$  mN/m), y este abatimiento del valor de  $\sigma$  ocurre de manera muy drástica hasta  $x \cong 10^{-8}$ ; entre  $x \cong 10^{-8}$  y  $x \cong 10^{-7}$  el abatimiento es mucho más moderado, y alrededor de  $x \cong 10^{-6}$  el valor de  $\sigma$  se estabiliza en  $\sim 42$  mN/m.



**Figura 2.** Tensión superficial  $\sigma$  de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  a  $25^\circ\text{C}$  obtenidos mediante el método del anillo de DuNoüy



**Figura 3.**  $\pi$  vs  $\ln x$  para las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  a  $25^\circ\text{C}$

$x_{C_{16}E_{20}}$	$\sigma$ mN/m	$u(\sigma)$ /mN/m	$\pi$ /mN/m	$n$
0.0000	71.69	0.02	0	9
$1.001 \times 10^{-10}$	70.75	0.14	0.94	18
$5.002 \times 10^{-10}$	66.36	0.18	5.33	15
$9.975 \times 10^{-10}$	61.01	0.67	10.12	17
$4.991 \times 10^{-9}$	56.09	0.21	15.6	11
$1.017 \times 10^{-8}$	52.92	0.31	18.77	12
$2.001 \times 10^{-8}$	48.28	0.41	23.41	19
$3.002 \times 10^{-8}$	47.46	0.28	24.23	14
$5.046 \times 10^{-8}$	46.12	0.21	25.57	20
$1.010 \times 10^{-7}$	44.16	0.33	27.53	18
$5.063 \times 10^{-7}$	42.42	0.15	29.27	18
$1.015 \times 10^{-6}$	42.03	0.10	29.66	11
$1.863 \times 10^{-6}$	41.57	0.04	30.12	12
$4.005 \times 10^{-6}$	41.95	0.06	29.74	18
$6.992 \times 10^{-6}$	41.63	0.03	30.06	18
$1.038 \times 10^{-5}$	41.50	0.03	30.19	12

**Cuadro 2.** Tensión superficial  $\sigma$  de las soluciones acuosas de  $C_{16}E_{20}$  a 25 °C obtenidos mediante el método del anillo de DuNoüy.  $n$  indica el número de repeticiones.

Ecuación	$x_{CMC}$	$\gamma_2^\infty$
(18)	$1.42 \times 10^{-7}$	$7.04 \times 10^6$

**Cuadro 3.** Resultados de  $x_{CMC}$  y  $\gamma_2^\infty$  para el  $C_{16}E_{20}$  en solución acuosa a 25 °C a partir de Equilibrio Solución-Superficie (ESS)

La Figura 3 ilustra la aplicación de la ecuación (18) a los resultados presentados en el Cuadro 2, De esta forma, se obtuvieron los valores de  $x_{CMC}$  y de  $\gamma_2^\infty$  (mediante la ecuación (16)) que se presentan en el Cuadro 3.

Observando los valores de  $x_{CMC}$  y de  $\gamma_2^\infty$  reportados en el Cuadro 3 se puede afirmar que el tensoactivo no iónico tipo etoxilado  $C_{16}E_{20}$  forma soluciones que rápidamente tienden a micelización a medida que la concentración en fracción mol de soluto aumenta desde cero. El valor de  $\gamma_2^\infty$  es bastante grande (en el orden de  $10^6$ ); esto indica que el tensoactivo no iónico  $C_{16}E_{20}$  forma soluciones altamente no ideales, lo cual permite afirmar que debe tener un efecto bastante evidente sobre la estructura del agua, teniendo en cuenta que el  $C_{16}E_{20}$  sin duda alguna que debe provocar cambios en la estructuración del agua como solvente para permitir la rápida micelización observada. Finalmente, el valor de  $x_{CMC}$  hallado en este estudio ( $1.42 \times 10^{-7}$ ) a través de medidas de tensión superficial y del uso de equilibrio solución superficie concuerda muy bien con lo



COEFICIENTE DE ACTIVIDAD DE  $C_{16}E_{20}$

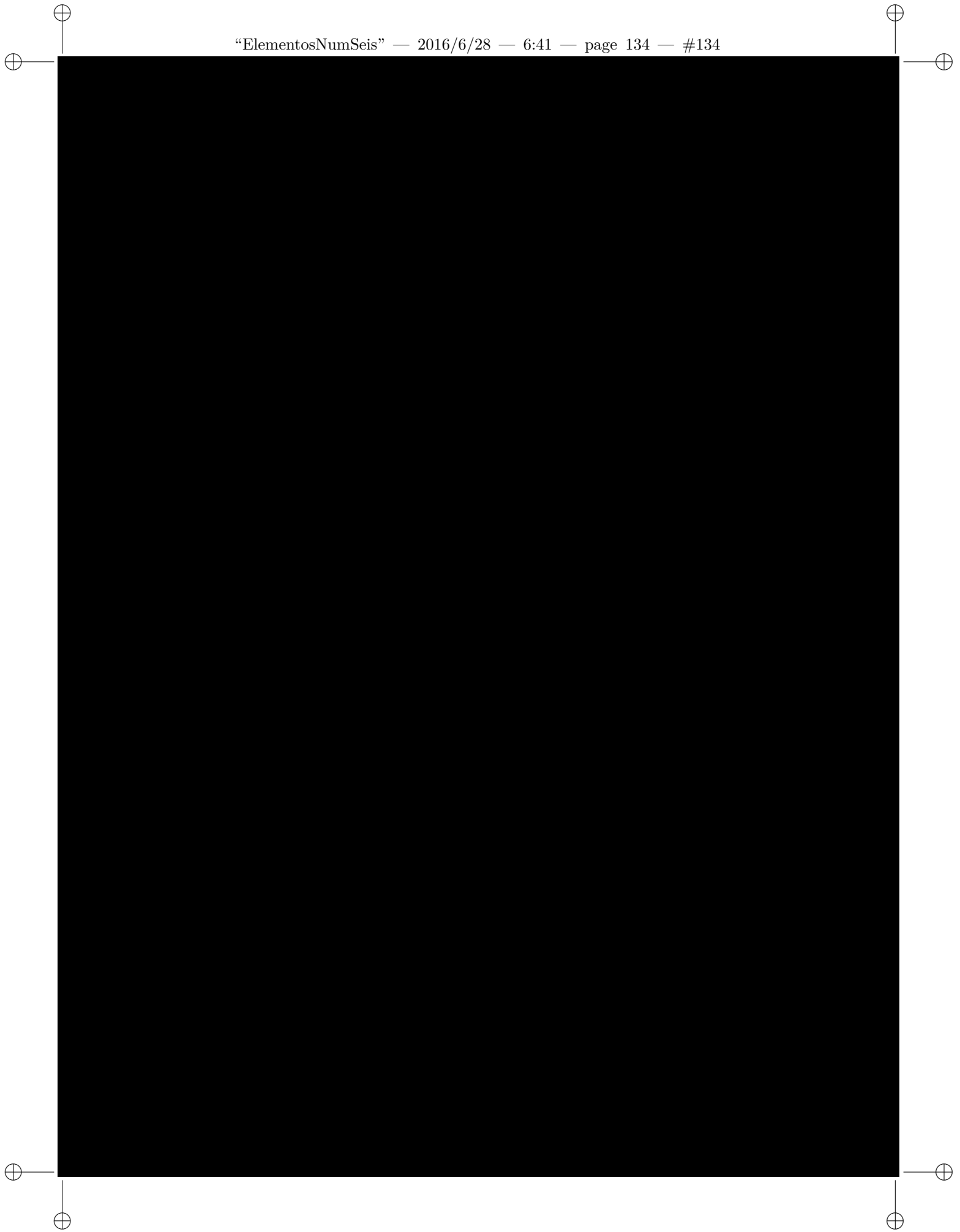
reportado en la literatura gracias al correcto uso del método del anillo y a la sólida fundamentación termodinámica que tiene la teoría sobre equilibrio solución-superficie usada en este trabajo.

#### 4. Conclusiones

Se determinaron los valores de tensión superficial  $\sigma$  de las soluciones acuosas del alcohol cetílico etoxilado con 20 moles de óxido de etileno  $C_{16}E_{20}$  a 25 °C obtenidos mediante el método del anillo de DuNoüy, y se obtuvieron los valores de  $x_{CMC}$  y  $\gamma_2^\infty$  (Cuadro 2) para el alcohol cetílico etoxilado con 20 moles de óxido de etileno  $C_{16}E_{20}$  en solución acuosa a 25 °C a partir de Equilibrio Solución-Superficie (ESS). Se encontró que el tensoactivo no iónico  $C_{16}E_{20}$  produce una rápida micelización, la cual queda prácticamente establecida, mostrando una presión superficial de saturación de  $\approx 30$  mN/m desde concentraciones tan pequeñas como  $1.015 \times 10^{-6}$ . Finalmente, se encontró que el tensoactivo no iónico  $C_{16}E_{20}$  tiene un gran efecto sobre la estructura del agua, en virtud de los valores de  $x_{CMC}$  y  $\gamma_2^\infty$  hallados en este trabajo.

#### Referencias

1. A. W. Francis, Am. Chem. Soc., Adv.Chem. Ser, Washington, DC (1961) No. 31.
2. N. Nishino, M. Nakamura, Bull. Chem. Soc. Jpn., 51 (1978) 1617.
3. F. Elizalde, J. Gracia, M. Costas, J. Phys. Chem. 92 (1988) 3565–3568.
4. J. L. López-Cervantes, J. Gracia-Fadrique, E. Calvo, A. Amigo, Fluid Phase Equilibria 356 (2013) 193–200.
5. J. Viades-Trejo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 264 (2008) 12–17.
6. E. Calvo, R. Bravo, A. Amigo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 282 (2009) 14–19.
7. J. Viades-Trejo, A. Amigo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 250 (2006) 158–164.
8. J. Aguila-Hernández, A. Trejo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 185 (2001) 165–175.
9. A. Patist, S.S Bhagwat, K.W. Penfield, P. Aikens, D.O Shah, Journal of Surfactants and Detergents, 3, 1 (2000) 53–58.
10. A. Helenius, K. Simons, Biochimica et Biophysica Acta, 415 (1975) 29-79.
11. P. Brocos, Á. Piñero, A. Amigo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 260 (2007) 343–353.
12. J. Viades-Trejo, A. Amigo, J. Gracia-Fadrique, Fluid Phase Equilibria 250 (2006) 158–164.
13. W. D Harkins, H. F Jordan. J. Amer. Chem. Soc., 52 (1930) 1751.
14. N. B. Vargaftik, B. N. Volkov, L. D. Voljak, J. Phys. Chem. Ref. Data 12, 3, 1983, 817-820.





# Propuesta de diseño de un simulador de un microscopio electrónico de barrido para el desarrollo de aprendizaje significativo en nanotecnología

## Design of a Sweep Electronic Microscopy Simulator for the Development of Meaningful Learning in Nanotechnology

July Alexandra Rincón Chacón<sup>1\*</sup>, Juan Camilo Guzman Monroy<sup>1\*\*</sup>, Herbert Edén Díaz Rodríguez<sup>2\*\*\*</sup>, Camilo Andrés Páez Gallo<sup>2†</sup>, Brayán Sneider Garzon<sup>3</sup>, Jose Fernando Arias Mendoza<sup>3</sup>, Juan Daniel Contreras Soto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación CIDEINNOVA, Centro Industrial y de desarrollo empresarial. Servicio Nacional de Aprendizaje. Soacha, Colombia.

<sup>2</sup> Semillero Desarrollo de videojuegos serios, Centro Industrial y de desarrollo empresarial. Servicio Nacional de Aprendizaje. Soacha, Colombia.

<sup>3</sup> Semillero Micronanotec, Centro Industrial y de desarrollo empresarial. Servicio Nacional de Aprendizaje. Soacha, Colombia.

FECHA DE ENTREGA: 1 DE MARZO DE 2016  
FECHA DE EVALUACIÓN: 11 DE ABRIL DE 2016  
FECHA DE APROBACIÓN: 9 DE MAYO DE 2015

**Resumen** Se hace un estudio donde se identifica la necesidad de herramientas virtuales de aprendizaje de bajo coste para la enseñanza en nanotecnología y se propone el diseño de un simulador educativo para un equipo de microscopía electrónica de barrido SEM referencia JEOL NeoScope JCM 5000 para implementarse en el entorno de desarrollo de videojuegos Unity para el fomento del aprendizaje significativo con estudiantes de básica secundaria, tomando como población de estudio los aprendices del programa de la Tecnoacademia nodo Cauca del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Se espera lograr identificar la diferencia en la implementación de éstas herramientas en el aprendizaje de técnicas de caracterización y el impacto que pueden generar éstas en el área de influencia.

**Abstract** his study identifies the need for affordable virtual learning tools to teach nanotechnology and proposes the design of an educational

---

\* alexandra.rch@misena.edu.co  
\*\* camilo.camilo.guzman@gmail.com  
\*\*\* hediaz@misena.edu.co  
† capaez96@misena.edu.co

simulator for a SEM sweep electronic microscopy device, reference JEOL NeoScope JCM 5000 to be implemented in the videogame development environment unity. All this in order for high school students to improve their learning process. We used as study population students of the program *Tecnoacademia nodo Cazucá* of the Learning National Service (SENA in Spanish.) We hope to be able to identify the difference between the implementation of these tools while learning characterization techniques and the impact the tools can generate within the influence area.

**Palabras Clave:** nanotecnología, videojuegos, SEM, Simulador, caracterización, aprendizaje, Unity.

**Keywords:** nanotechnology, videogames, SEM, simulator, characterization, learning, Unity.

## 1. Introducción

La nanotecnología es un área que estudia y manipula materia a escala nanométrica, es decir, trabaja materiales a escalas de nanómetros ( $1 \times 10^{-9}$  metros) [1] buscando aplicabilidad de ésta materia en industrias como la medicina, de nuevos materiales, textiles, químicas farmacéuticas, entre otras industrias [2,3,4]. En Colombia, la nanotecnología es un área de investigación emergente que tiene limitaciones económicas puesto que el costo de desarrollo requiere grandes inversiones y espacios adecuados que no son fáciles de conseguir y, por otro lado, aunque se están haciendo grandes esfuerzos para crear programas académicos especializados en el área [5], se puede afirmar que la cantidad de programas académicos en nanotecnología existentes son insuficientes para el desarrollo científico, tecnológico e industrial del país.

Para suplir una de las necesidades planteadas anteriormente, el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) desde el sistema de investigación, desarrollo tecnológico e innovación (SENNOVA) implementó el programa Tecnoacademia con el objetivo de vincular jóvenes de poblaciones vulnerables en el desarrollo de cursos complementarios por proyectos en ambientes de formación de última tecnología, en donde una de las líneas de investigación se especializa específicamente en solucionar necesidades del sector industrial a partir del estudio en nanotecnología. Haciendo un reconocimiento de las necesidades en el Nodo Cazuca de la Tecnoacademia se pudo evidenciar que el área de nanotecnología trabaja de forma muy limitada con un microscopio electrónico de barrido SEM (*Scanning Electron Microscope*) de referencia JEOL NeoScope JCM 5000 por las mismas razones económicas que se han expuesto anteriormente en el contexto nacional. Por lo tanto, se hace necesario introducir una herramienta de aprendizaje de bajo coste y alta efectividad que estimule el aprendizaje significativo con respecto al uso del SEM en los aprendices.

Antes de hacer una propuesta de una herramienta de aprendizaje adicional que podría solucionar la necesidad planteada es necesario hacer la siguiente contextualización pedagógica: El aprendizaje significativo enmarcado dentro de la pedagogía constructivista implica una formación a partir de la experiencia,

MICROSCOPIO ELECTRÓNICO APRENDIZAJE NANOTECNOLOGÍA

es decir, ocurre cuando una nueva información se conecta con un concepto relevante preexistente en la estructura cognitiva. Esto implica que las nuevas ideas, conceptos y proposiciones pueden ser aprendidos significativamente en la medida en que otras ideas, conceptos o proposiciones relevantes estén adecuadamente claras y disponibles en la estructura cognitiva del individuo y que funcionen como un punto de anclaje a las primeras [6,7]. Teniendo en cuenta lo anterior, se busca entonces que, mediante una herramienta de aprendizaje, el aprendiz encuentre un medio por el cual viva la experiencia previa al uso del microscopio y paralela a la teoría, con la esperanza que se logre que el uso real y posterior del equipo sea adecuado y eficiente. Una de las herramientas que podría superar la brecha entre la teoría y la práctica de forma que el aprendiz fluya en un proceso dinámico es la *simulación*, entendiéndola como el “hacer parecer real algo que no lo es”. La simulación con fines pedagógicos consiste en la utilización de diversos métodos de réplica artificial de fenómenos, procesos, o situaciones del mundo real con el fin de lograr un objetivo académico específico, siendo éste un acelerador de los procesos de aprendizaje al poner en la práctica lo que en ocasiones es confuso en la teoría [8].

El uso de los simuladores con fines educativos como herramientas complementarias de aprendizaje han sido implementados a muchos niveles educativos en varias áreas del conocimiento con muy buenos resultados [8,9] puesto que, teniendo en cuenta lo anterior, la simulación guarda gran relación con la lúdica. En el juego, el ser humano es capaz de imaginarse la realidad del juego, tal como menciona Johan Huizinga en *Homo Ludens* [10]. Y aunque normalmente el juego se presenta solamente desde la esfera de lo infantil, en la actualidad este abarca cada vez más escenarios de acción donde sus elementos ayudan a resolver problemas de carácter diferente al juego. Uno de los campos de acción en donde se han obtenido muy buenos resultados es el educativo [11]. En general, el juego con el paso del tiempo y gracias a la tecnología se ha convertido en una actividad que ya no sólo tiene que ver con el entretenimiento, sino que bien empleado puede ser una herramienta de crecimiento humano y social, de ella parte el concepto de *gamificación*, que se refiere a la implementación de elementos de diseño de videojuego como las mecánicas o dinámicas de juego dentro de un contexto fuera del entretenimiento para solucionar problemas en distintas industrias [12].

Una de las herramientas que es una simulación pero que a su vez tiene elementos de diseño de videojuegos son los *simuladores educativos*, es decir, herramientas de aprendizaje que emulan un fenómeno o actividad determinada a través de la interacción, porque permite la simplificación de fenómenos o procesos sin perder su efectividad para el aprendizaje significativo [13]. En nanotecnología, los simuladores educativos han sido usados ampliamente para simulaciones que explican la escala nanométrica o el funcionamiento operativo de equipos como el SEM [14,15] con un éxito considerable. El problema que tienen en general estas aplicaciones es que no están correctamente *gamificadas*, lo cual genera inconvenientes mencionados anteriormente con respecto al objetivo que deben cumplir estas herramientas de aprendizaje.

Desde un punto de vista técnico, para superar éstas falencias que tienen los simuladores educativos en la actualidad y, por otro lado, para suplir las necesidades que tienen entidades como la Tecnoacademia, se propone el diseño de un simulador del funcionamiento y operación de un microscopio electrónico de barrido con la esperanza de estimular en aprendices de nanotecnología habilidades a niveles educativos de mínimo básica secundaria. A continuación, se mostrarán los conceptos claves a la hora de describir el funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido para luego hacer una propuesta de herramienta de aprendizaje, teniendo en cuenta conceptos de diseño de juego.

## 2. Metodología

### 2.1. Introducción a la microscopía electrónica de barrido

Desde la antigüedad el hombre ha buscado hacer visible lo que se creía invisible. Para superar este reto se diseñaron objetos transparentes limitados por dos superficies, donde alguna de ellas es curva; con el objetivo de curvar la luz y hacer que los objetos pequeños se vean de mayor tamaño. Estos dispositivos son denominados lentes ópticos y se usaron para construir los primeros microscopios. La microscopía inicia con equipos que utilizan propiedades físicas de la luz como herramienta fundamental de los sistemas ópticos, y posteriormente se fue refinando mediante la implementación de múltiples técnicas que solucionaban problemas específicos en cuanto a análisis de muestras. Recientemente se ha adoptado el uso de microscopía electrónica, en donde la esencia radica en el uso de propiedades físicas de los electrones que permiten obtener imágenes con mayor resolución, cumpliendo un papel fundamental en la caracterización de muestras a escala nanométrica por la capacidad de aumento y resolución de dichos equipos. [16,17].

El equipo de microscopía robusta denominado microscopio electrónico de barrido (SEM) es utilizado para la caracterización de materiales a escala micrométrica y nanométrica, con la capacidad de ofrecer al usuario un amplio rango de información de la superficie de la muestra. La obtención de una imagen por medio de un SEM se da gracias a la combinación de los instrumentos mostrados en la figura 1, que cumplen las siguientes funciones [18]:

- **Unidad óptico electrónica:** Sistema de instrumentos constituida por un cañón electrónico con una fuente emisora de electrones generados mediante el paso de una corriente eléctrica por un cátodo de Tungsteno y un sistema de 2 a 4 lentes electrónicos cuya función es disminuir el diámetro del haz de electrones de aproximadamente  $50 \mu\text{m}$  en su origen a valores comprendidos entre 25 y 10 no.
- **Sistema de barrido:** Arreglo de bobinas que generan un campo de flexión simple o doble que produce el desplazamiento del haz de electrones sobre la superficie de la muestra.
- **Sistema de vacío:** Sistema de bombas mecánicas o rotatorias que crean un vacío que permite el desplazamiento de electrones, incrementando la vida

MICROSCOPIO ELECTRÓNICO APRENDIZAJE NANOTECNOLOGÍA

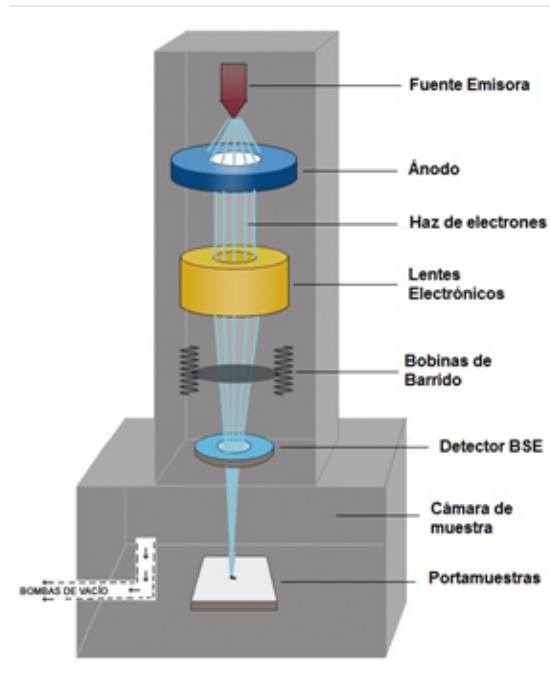
útil del filamento, y así evitando descargas de alta tensión en el cañón o contaminación de la muestra.

- **Porta muestras:** Está situada en la base de la columna del microscopio y en línea con la fuente emisora de electrones, soportada por una platina que tiene un desplazamiento perpendicular al eje coordenado del haz de electrones.
- **Sistema de detección:** Sistema que procesa la información de las interacciones entre el haz de electrones y la muestra, el cual debe ser de alta sensibilidad, alta frecuencia y amplitud dinámica, que es la capacidad para detectar la variación entre dos puntos en magnitudes de 100 a 1 sin pérdida de linealidad.
- **Sistemas de refrigeración:** Sistema que regula la temperatura en el arreglo de bombas y de lentes mediante la circulación de agua tratada, filtrada y refrigerada.
- **Sistema de proyección de las imágenes:** Consta de dos tubos de rayos catódicos de resolución que funcionan en sincronización con el barrido electrónico que proyectan las imágenes según el patrón de líneas generado mediante el barrido hecho por las bobinas en el sistema óptico electrónico.
- **Sistema de procesamiento de la imagen con la ayuda computacional:** *Software* que procesa la señal obtenida por los rayos catódicos.

La fuente emisora genera un haz de electrones que pasan a través de una columna en la que existe un ambiente de vacío. Este haz concentrado es guiado por la unidad óptico eléctrica hasta hacerse un haz puntual que, mediante el sistema de barrido, que genera un escaneo línea por línea de manera uniforme sobre la muestra. El funcionamiento del SEM tiene como principio la emisión de los electrones provenientes de un cátodo de tungsteno que pasa a través de una columna en la que existe un ambiente de vacío. Este haz concentrado es guiado por una serie de lentes electromagnéticas hasta hacerse un haz puntual, el cual es puesto sobre la superficie de la muestra, de tal forma que haga un barrido línea a línea de manera uniforme, obteniendo así un *patrón de barrido de trama*. Este movimiento se consigue gracias a un sistema de bobinas de barrido situadas en la columna del instrumento [16,17,18].

Tal como se muestra en la figura 2, existen diversas interacciones entre haz y la muestra, produciendo tipos de electrones resultantes (figura 1) según su cantidad de energía y el tipo de información que se obtendrá de la misma. Algunos tipos de electrones resultantes son [16]:

- **Secundarios:** Son producidos cuando el haz de electrones pasa muy cerca del núcleo del átomo de material de la muestra, son de baja energía ( $\leq 5$  eV), proporcionan información topográfica.
- **Retro dispersados:** Se producen cuando el haz de electrones choca fuertemente con el núcleo de los átomos de la muestra, produciéndose una fuerza de repulsión en dirección contraria. Interacción utilizada para obtener información sobre la composición superficial de la muestra.
- **Auger:** Cuando los electrones secundarios son expulsados del átomo se produce un exceso de energía, emitiendo nuevos electrones de la capa más externa, los cuales brindan información de pequeños volúmenes de la muestra.



**Figura 1.** Esquema que muestra los principales componentes de un SEM (Tomado del Autor).

- **Rayos X:** La producción de estas partículas es independiente del haz del microscopio. Los rayos X son utilizados para caracterizar cada elemento de la muestra de un volumen grande de la muestra.

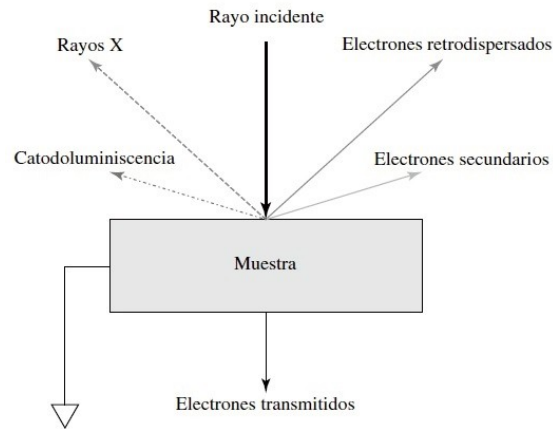
Una de las principales ventajas del uso de SEM para caracterización de materiales es la sencilla preparación de las muestras y la gran profundidad de campo que le da la apariencia tridimensional de las imágenes, permitiendo enfocar y observar amplias zonas de la muestra. El uso de la técnica SEM es aplicable en industrias textiles, metalúrgicas, de ciencias de los materiales, biológicas y ciencias forenses. El funcionamiento óptimo de éste equipo requiere que las muestras sean conductoras y libres de humedad. La principal limitación del uso del SEM es la observación de estructuras internas y detalles ultra estructurales de las muestras [16,18].

## 2.2. Propuesta de diseño de simulador educativo

Para empezar a hacer una propuesta de simulador para el SEM de referencia NeoScope JCM 5000 es necesario establecer una lista de requerimientos. De otra forma, hay que establecer el conjunto de servicios que ha de ofrecer el



MICROSCOPIO ELECTRÓNICO APRENDIZAJE NANOTECNOLOGÍA



**Figura 2.** Diagrama de señales que se genera con un SEM [16].

simulador y las características asociadas a su funcionamiento y rendimiento. A continuación, se muestran los requisitos *funcionales* (¿Qué debe hacer?) y *no funcionales* (¿Cómo debe ser?) establecidos para el simulador.

*Requisitos funcionales:*

- Abrir y cerrar la cámara del SEM y colocar una muestra que se seleccionará de un conjunto de opciones disponibles.
- Mostrar la imagen en una pantalla donde se vean datos de brillo, contraste, escala, voltaje y resolución.
- Ajustar automáticamente o manualmente variables de brillo, contraste, foco y escala de la imagen en el SEM mediante interruptores.
- Mostrar ayudas por medio de paneles en 2D para todos los parámetros variables cuando el mouse esté sobre éstos.
- Mover la muestra según funcionamiento real del SEM mediante perillas, lo cual debe reflejarse en un “movimiento” horizontal y vertical de la imagen. Dicho movimiento debe poder hacerse en dos ejes coordenados e independientes y debe ser limitado.
- Medir el tamaño de partícula mediante un trazo hecho con el mouse. El dato debe mostrarse al costado de la imagen.
- Encender el *software* de procesamiento de imágenes por medio de un botón.
- Cambiar el voltaje de la fuente emisora y la resolución de la imagen tomada mediante interruptores.
- Prender y apagar la fuente emisora mediante un botón.
- Evaluar el resultado de aprendizaje con respecto a la imagen final obtenida.

*Requisitos no funcionales:*

- Disponible para plataforma PC, usando como dispositivos de entrada teclado y mouse.
- El modelo del SEM debe ser realista y lo más detallista posible, teniendo como limitación el rendimiento informático de los equipos de cómputo que se encuentran en la población de estudio.
- El SEM debe estar colocado en un entorno de laboratorio 3D. Los objetos de éste entorno deben estar modelados a bajo poligonales.
- Diseño basado en *flat design* porque minimiza recursos de iluminación y render de texturas.
- La retroalimentación del sistema frente al usuario debe ser 2D con uso de imagen en formato PNG y texto.
- La GUI, es decir, los elementos de la interfaz, deben ser limpias con ventanas emergentes en 2D.
- Debe tener un PNJ (personajes no jugables) que cumpla la función de guiar al usuario en el manejo del simulador.
- El simulador debe ser desarrollado en un tiempo de 7 semanas aproximadamente.

El simulador debe contar con un tutorial guiado en donde al aprendiz se le da una serie de indicaciones básicas del funcionamiento y operación del SEM que le permitirán obtener una imagen usando la técnica de microscopía electrónica de barrido y pos procesarla para obtener información deseada sobre la muestra colocada. El tutorial está diseñado para aprendices que no tienen ningún conocimiento previo en el área de nanotecnología, y, por ende, caracterización por microscopía electrónica de barrido. El aprendiz deberá enfrentarse a un conjunto de retos relacionados con los siguientes procesos, teniendo en cuenta el nivel de dificultad:

- **Fácil:** Reconocimiento de equipo y *software*.
- **Medio:** Obtención de una imagen por medio del uso del *software* del equipo.
- **Difícil:** Pos procesamiento de la imagen tomada para el análisis de información.

En la figura 3 se puede ver esquemáticamente lo dicho anteriormente y también se pueden ver dos modos de juego: Un modo en el cuál el aprendiz puede seleccionar un reto en concreto (libre) y otro en el cuál el aprendiz pasará por cada uno de los niveles de dificultad de forma creciente. Los retos que se mencionan en la figura 3 deben estar diseñados para que el aprendiz no pueda realizar un nuevo reto sin haber culminado con éxito el reto anterior con el fin de verificar que éste ha aprendido lo necesario para seguir con el siguiente reto. Y así facilitar el aprendizaje con respecto al manejo del equipo y desarrollo de la técnica de caracterización de microscopía electrónica de barrido como se lleva a cabo en la vida real.

La lista de requerimientos permite a todas las personas involucradas en el proceso de diseño y desarrollo de la aplicación establecer una planeación de acuerdo a las áreas de diseño, programación, animación, ingeniería de sonido y testing, entre otras, tal como muestra la figura 4. El proceso que se va a

MICROSCOPIO ELECTRÓNICO APRENDIZAJE NANOTECNOLOGÍA

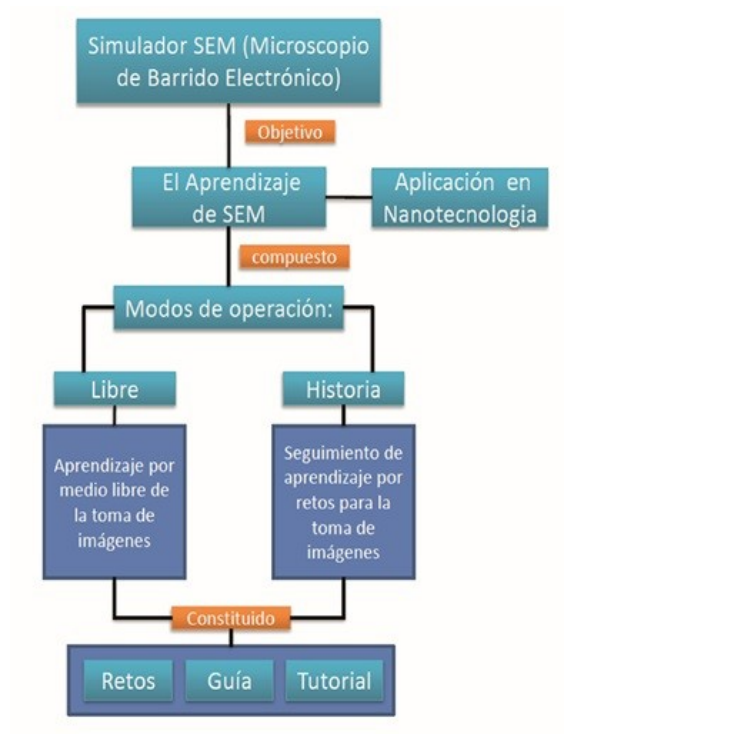
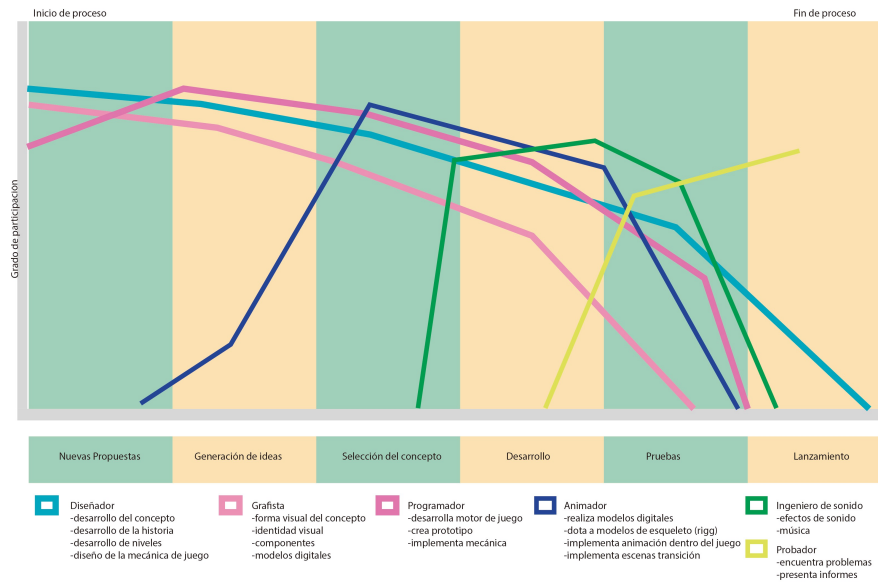


Figura 3. Módulos de contenido del simulador (Tomado del Autor).

trabajar para desarrollar el simulador educativo se compone de tres grandes fases: Preproducción, producción y postproducción. [20]

En la preproducción se hace toda la planeación en todas las áreas involucradas en el desarrollo del simulador, con el propósito de establecer los elementos más viables a implementar para cumplir con las listas de requerimientos, y así poder descartar muchos elementos con una pérdida de tiempo mucho con respecto a la que se tendría si se hiciera éste proceso en fases siguientes a ésta. En la preproducción se ejecutan procesos como el diseño de personajes, guiones, objetivos, y en el caso de aplicaciones con elementos de gamificación, mecánicas y dinámicas de juego. Luego de haber realizado toda la planeación de la aplicación se pasa al proceso de producción, en donde se establece una *línea de producción* y un flujo de trabajo con propósitos de maximizar la eficiencia en el desarrollo de aplicaciones.

Cuando se tiene la aplicación como prototipo o como producto terminado se entra en la fase de postproducción, en la cual se prueba la aplicación en un público de referencia y se analizan variables que dan cuenta del impacto de la aplicación en el público escogido.



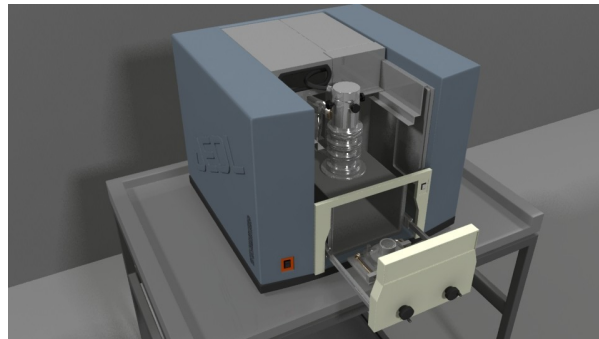
**Figura 4.** Gráfico de la distribución de trabajo en la línea de producción en el desarrollo del simulador (Tomado del Autor).

Ahora, teniendo en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior, para el simulador educativo se hace la siguiente proyección: En la pre producción se diseña un manual operativo del simulador del SEM referencia JEOL NeoScope JCM 5000, mostrado en la figura 5, para establecer claramente el proceso por el cual éste equipo obtiene una imagen. Luego, en base al manual, el área de diseño establece el guión y el *storyboard*, definidos como la descripción gráfica del guion tipo cómic que describe las acciones que desarrollará el usuario paso por paso en el simulador dependiendo de la meta a conseguir. Para desarrollar un buen guión es necesario ejecutar los siguientes procesos [20]:

- Diseño de personajes.
- Diseño de la interfaz de usuario (GUI).
- Diagrama de flujo de nivel, en donde se muestra todos los procesos que son posibles de realizar dentro del simulador de SEM.

Luego se debe trabajar para construir todo el contenido que debe ser ensamblado en la etapa de implementación: Modelos 3D, gráficas 2D, e interfaz gráfica. Todos los elementos que van a estar en el simulador se integran en el entorno de desarrollo de videojuegos Unity para el desarrollo final de un prototipo funcional. Finalmente, para la postproducción se debe probar el simulador en los estudiantes del ambiente de formación en nanotecnología de la Tecnoacademia nodo Cazuca del SENA para evaluar los resultados teniendo en cuenta el desarrollo de aprendizaje significativo. Los resultados de aprendizaje se evalúan por medio de

## MICROSCOPIO ELECTRÓNICO APRENDIZAJE NANOTECNOLOGÍA



**Figura 5.** Render de microscopio JEOL NeoScope JCM 5000 (Tomado del Autor).

evidencias de desempeño, siguiendo la misión de formación profesional integral en nanotecnología.

### 3. Resultados Esperados

El simulador educativo como herramienta para desarrollar aprendizaje significativo en nanotecnología tendrá un gran impacto en el área de influencia puesto que no existen referentes de simuladores de éste tipo y por su bajo costo, y debería incentivar a otras instituciones o empresas a considerar éste tipo de simuladores como herramienta principal o complementaria de aprendizaje.

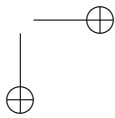
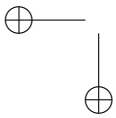
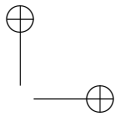
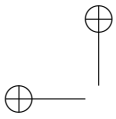
Los aprendices que usen el simulador educativo podrán manejar de forma más eficiente el microscopio JEOL NeoScope JCM 5000, y por ende abordar proyectos de investigación y productivos con más conocimiento, lo que debería afectar positivamente el desarrollo de los mismos.

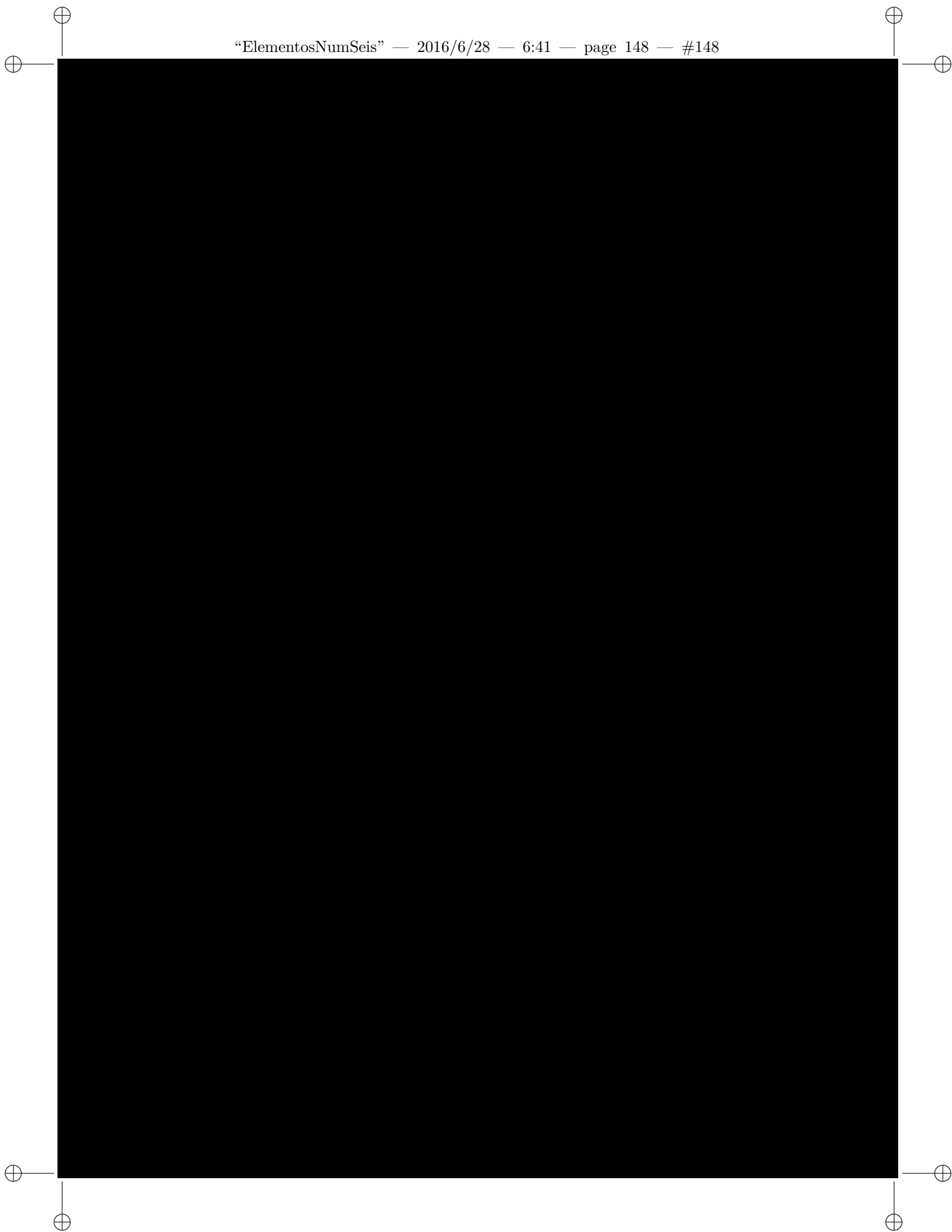
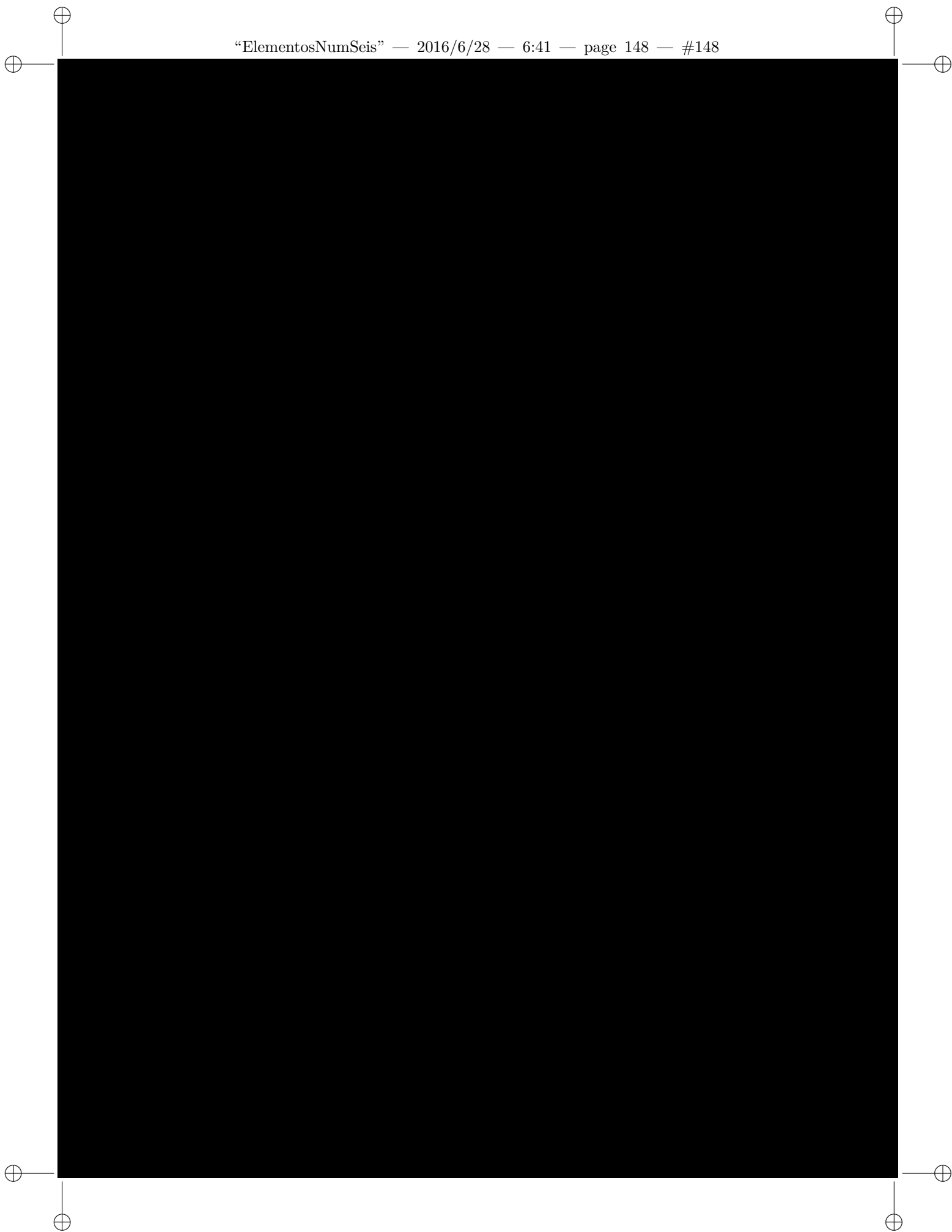
### Referencias

1. Debbie, Lisa y Nanoinc. Introduction to Nanoscale Science and Technology. Nanoprofessor. Skokie, Illinois, 2010.
2. El bogotano que triunfa con nanotecnología en Nueva York. <http://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-nanotecnologia-abre-paso-colombia-ingenio-bogotano/210883>. Revista Dinero. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].
3. Naik, Arun. Fundamentos de la microscopía electrónica y su aplicación en la investigación textil. Boletín del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial, 1975, no 64, p. 39-50.
4. Torres, T. L.; Mora, C. E. Aplicación de la microscopía electrónica de barrido en la evaluación de dos materias primas cosméticas como restauradoras de la cutícula capilar. Revista Colombiana de ciencias químico farmacéuticas. Vol. 39 (I), 5-20. 2010.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

5. Mora Mendoza, Víctor Hugo. Sena le apuesta a la nanotecnología con inversión de millones de dólares. El Universal. <http://www.eluniversal.com.co/tecnologia/sena-le-apuesta-la-nanotecnologia-con-inversion-de-millones-de-dolares-151692>. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].
6. Castillo S. Propuesta pedagógica basada en el constructivismo para el uso óptimo de las TIC en la enseñanza y el aprendizaje de la matemática. Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa 11(2): 171-194, 2008.
7. Díaz A; Hernández G. Estrategias docentes para un aprendizaje significativo: Una interpretación constructivista. Segunda Edición. Mc Graw Hill. México, 2002.
8. Gómez L. Entrenamiento basado en la simulación, una herramienta de enseñanza y aprendizaje. Revista colombiana de anestesiología. Vol. 32, Número 201. Colombia, 2004.
9. Gredler M. Educational Games and Simulations: A technology in Search of a (Research) Paradigm. Handbook of Research for Educational Communications and Technology. 521 -540. 1996.
10. Huizinga J. Homo Ludens (en papel). Alianza Editorial. Madrid, 2004.
11. García R.; Contreras G.; Ramírez M. Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia de conocimiento. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=68820841008>. ISSN 1665-6180. [Fecha de consulta: 23 de marzo de 2016].
12. Baldwin A.; Dahlberg S. Gamification of a Physics Simulation Tool. Thesis. Malmö University. Suecia, 2015.
13. Valverde J. The Learning of History and Educational Simulation. Tejuelo: Didáctica de la Lengua y la Literatura. Vol. 9 (9). Pags. 83-99. 2010.
14. Peng X; Isaac B.; Wilkins R. Development of nanoscale virtual reality simulations for the teaching of nanotechnology. Computer in Education Journal. Vol. 23(I). 25-34. 2013.
15. Australian Microscopy & Microanalysis Research Facility. <http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/practice/>. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].
16. Skoog D.; Holler F.; Crouch S. Principios de análisis instrumental. Sexta Edición. Cengage Learning Editores. México, 2008.
17. Renau J.; Faura M. Principios básicos del microscopio electrónico de barrido. Centro de Investigación Hospital “La Fe”. Págs. 73-92. España.
18. Pilleux M.; Poblete V. Microscopía electrónica de Barrido. Seminario de Electrónica de barrido. Universidad de Chile, 2011.
19. Descripción de la técnica MEB. <https://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/en/centro-de-microscopia/microscopio-electronico/-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad de los Andes. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].
20. Thompson, J.; Berbank-Green B.; Cusworth N. Videojuegos: Manual para diseñadores gráficos. Editorial Gustavo Gili. SL, Barcelona, 2008.









# Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas

## Integration of Fuzzy Logic with System Dynamics for the Selection of Farming Soils

Natalia Martínez Rojas\*, Hugo Hernando Andrade Sosa\*\*

Universidad Industrial de Santander

FECHA DE ENTREGA: 14 DE ABRIL DE 2016  
FECHA DE EVALUACIÓN: 10 DE MAYO DE 2016  
FECHA DE APROBACIÓN: 27 DE MAYO DE 2016

**Resumen** La instalación de un sistema agrícola es un proceso complejo que requiere de un conocimiento tanto del tipo de cultivo como de análisis de terrenos de tal forma que se puedan obtener los mayores beneficios. Es por esto que el propósito de este artículo es integrar la lógica difusa a modelos realizados con Dinámica de Sistemas, con el fin de apoyar la toma de decisiones de los agricultores. Con el modelo, el productor puede simular y experimentar de forma iterativa para evaluar posibles escenarios que le permitan tomar acciones correctivas antes de realizar la instalación de determinado cultivo.

**Abstract** The installation of a farming system is a complex process that requires knowing the type of crop and the analysis of the soil to obtain more benefits. For this reason, the purpose of this article is to integrate fuzzy logic with models made with system dynamics in order to support the farmers on the decision making process. With this model, the producer can simulate and repeatedly experiment the evaluation of possible scenarios that enable corrective actions before growing a specific crop.

**Palabras Clave:** Dinámica de Sistemas, lógica difusa, suelos, agricultura, toma de decisiones.

**Keywords:** System dynamics, fuzzy logic, soil, agriculture, decision making.

---

\* [natica@simon.uis.edu.co](mailto:natica@simon.uis.edu.co)

\*\* [handrade@uis.edu.co](mailto:handrade@uis.edu.co)

## 1. Introducción

Este artículo muestra cómo, resultado de integrar la lógica difusa con la Dinámica de Sistemas, surge un lenguaje de construcción y reconstrucción de conocimiento que al poder considerar raciocinios de carácter cuantitativo y cualitativo, junto con las potencialidades de la representación de sistemas realimentados fundados en ecuaciones diferenciales lineales y no lineales; permite abordar la complejidad dinámica sistémica de los asuntos en los cuales el ser humano toma de decisiones con propósito de intervención [6].

El modelado y la simulación por computador permiten apoyar y facilitar la evaluación de un conjunto de parámetros para el estudio y análisis de terrenos. Ellos proveen por medio de herramientas tecnológicas, la información necesaria, para que el agricultor o profesional pueda tomar decisiones en función de las metas

de producción. Estas herramientas, son concebidas como sistemas expertos que apoyan la toma de decisiones [10]; donde el usuario analiza, interpreta y evalúa, diferentes escenarios de producción en función de la información registrada y procesada por el sistema de inferencia difuso; lo cual, conduce a maximizar la productividad [9].

El uso de la lógica difusa en la evaluación de terrenos es de particular importancia ya que es posible minimizar el efecto de cualquier característica cuando alcanza un valor inmediatamente exterior a su rango establecido, como se presenta en la lógica clásica [15] [4]. Los controladores difusos aprovechan las expresiones lingüísticas suministradas por los expertos que tienen amplio conocimiento en el estudio de los terrenos [8].

## 2. Metodología

A continuación se presenta brevemente la Dinámica de Sistemas (DS) en su proceso de modelado, la Lógica Difusa en la construcción de los sistemas de inferencia difusa integrables en el modelo de DS; para luego ilustrar las potencialidades de la integración propuesta, en términos de un modelo de simulación para cultivos agrícolas con valoración cuantitativa y cualitativa del suelo.

### Dinámica de Sistemas

Los modelos con Dinámica de Sistemas representan los flujos de material (procesos) y de información a través de los cuales se conectan los estados del sistema con los puntos de decisión, y también con las consecuencias de esas decisiones, mostrando ciclos de realimentación de refuerzo o balance. Dado que estos ciclos incluyen, frecuentemente, retardos y relaciones no lineales, se hace necesario el uso de la simulación para obtener las consecuencias temporales asociadas a estas estructuras causales complejas, de forma que los comportamientos contraintuitivos puedan ser analizados de forma rigurosa para entender a qué se deben.

Estos modelos permiten también el diseño de nuevas políticas para el sistema, así como avanzar en la comprensión de sus posibles consecuencias [26].

“La Dinámica de Sistemas es una alternativa para dar cuenta de la complejidad dinámica de los fenómenos explicables en términos de sistemas en donde la variedad en los campos de aplicación la proponen como una metodología” [13]. La DS provee una herramienta de comunicación común conectando varias disciplinas académicas, ya que fuerza a las personas a pensar críticamente sobre los problemas debido al proceso que deben seguir. Con la Dinámica de Sistemas, se puede hacer un enlace mental entre la estructura de un sistema y el comportamiento que este produce, a través de modelos, los cuales son una parte del sistema que cambia con respecto al tiempo, que comparado con un sistema en tiempo real tiene un costo más bajo y permite un conocimiento más rápido de las condiciones que no se observan en la vida real [2].

En la literatura se pueden encontrar clasificaciones de las etapas en las que se puede realizar un estudio de Dinámica de Sistemas: Forrester [11], Schaffernicht [25], Aracil [3]; Coyle [7]; Andrade [2] entre otras.

Basándose en dichas clasificaciones y con la intención de describir cual fue la guía a seguir en el presente estudio, se consideró un estudio de Dinámica de Sistemas siguiendo lo propuesto por Andrade. La Figura 1 muestra el esquema, resaltando que el proceso completo debe ser considerado iterativo, en el sentido en que las distintas etapas pueden ser revisitadas tantas veces como se considere necesario.

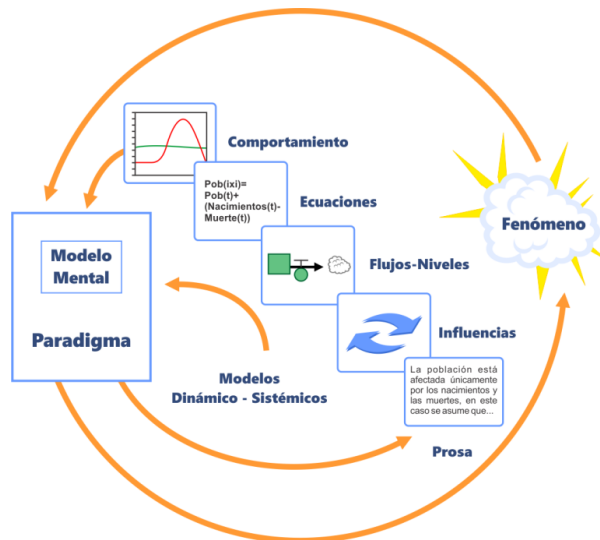


Figura 1. El modelado con Dinámica de Sistemas. Fuente: [2]

La Dinámica de Sistemas proporciona un sistema de lenguajes con los cuales es posible expresar la causalidad. Los modelos Dinámico-Sistémicos son escritos en esos lenguajes [2]. La Figura 1 muestra los diferentes tipos de lenguajes:

1. El *lenguaje en prosa*, es el usado cotidianamente, es posible hablar en términos de las causalidades y como estas condicionan el comportamiento.
2. Los *diagramas causales* y los *diagramas de flujos y niveles*, tienen un carácter gráfico. En cada uno de ellos se puede dibujar y apreciar visualmente la estructura causal con sus ciclos de realimentación. Para cada uno de estos diagramas existe una lógica que permite inferir comportamientos posibles del sistema a partir de las estructuras que allí aparecen [2].
3. Las *ecuaciones* puede representar la estructura causal como un sistema de ecuaciones diferenciales. Con la representación matemática del sistema y haciendo uso de herramientas especializadas, se puede simular en el computador, con amplias facilidades para la interacción en un lenguaje visual de definición de escenarios de simulación y presentación de *comportamientos* [2]. Al aporte de la dinámica de cambio que hacen las ecuaciones diferenciales, es posible integrar aportes de otras herramientas matemáticas como la lógica difusa, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y la estadística en representaciones de sucesos determinísticos o estocásticos.

Cada uno de los lenguajes de la Dinámica de Sistemas satisface de manera particular los requerimientos de un modelo Dinámico-Sistémico y en conjunto las representaciones dinámico sistémicas sustentan y presentan un modelo de Dinámica de Sistemas, aunque una representación en particular no necesariamente requiere de los cinco lenguajes, todo depende del propósito del modelo.

### 2.1. Lógica difusa

Es la lógica que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas [19], es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total.

Cabe recalcar que lo difuso, borroso, impreciso o vago no es la lógica en sí, sino el objeto que estudia, la medición y valoración de sus características. La Lógica Difusa permite tratar información imprecisa, como estatura media o temperatura baja, en términos de conjuntos difusos que se combinan en reglas para definir acciones: si la temperatura es alta entonces enfriar mucho. De esta manera, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos difusos, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

Los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos sólo contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo la lógica difusa considera que un conjunto no tiene una frontera clara que permita decir si un elemento pertenece o no a él. Mediante una función se asigna a cada elemento

del conjunto un grado de pertenencia entre 0 y 1. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso.

La única condición que debe cumplir una función característica es que tome valores entre 0 y 1, con continuidad. Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano de los expertos, y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar la función [20].

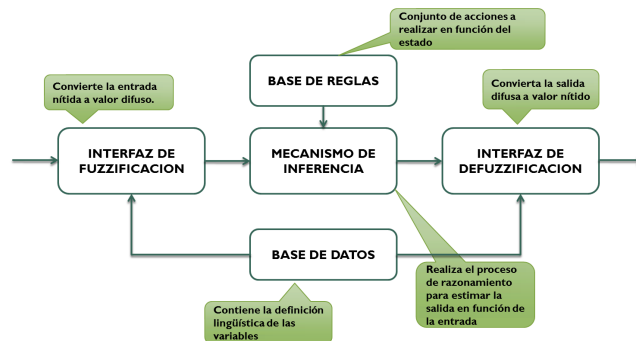
Concepto	Descripción	Ejemplo
Variable lingüística	Es aquella noción o concepto que vamos a calificar de forma difusa	Altura
Universo de discurso	Es el rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística	Conjunto de valores comprendido entre 1,5 y 2,3 m.
Valor lingüístico	Son las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística	“Bajo”, “Mediano” y “Alto”.
Función de pertenencia	Aplicación que asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado	

Cuadro 1. Conceptos básicos de la lógica difusa

## 2.2. Sistemas basados en lógica difusa

Tradicionalmente los sistemas de control inteligente combinan la teoría clásica de control con técnicas de inteligencia artificial [23] [20]. Los sistemas de control inteligentes de mayor implantación son los controladores difusos [24].

Para la construcción de un sistema basado en reglas difusas como se muestra en la Figura 2 está compuesto por la interfaz de fuzzificación, mecanismo de inferencia, base de reglas, base de datos e interfaz de defuzzificación [16] ([4]. Esto se puede implementar en un modelo con Dinámica de Sistemas, utilizando en *software* Evolución, en donde un modelo cuantitativo a través del componente FIS [17] contempla consideraciones cualitativas.



**Figura 2.** Estructura básica de un sistema de inferencia difuso. Fuente: Adaptación de [14]

1. Base de conocimiento

- Base de reglas: Una regla difusa *if-then*, es una regla del tipo *si x es A entonces y es B*. En donde A y B son etiquetas lingüísticas definidas en sus respectivos universos X e Y.  
La parte *si x es A* es el antecedente, *y es B* el consecuente.
- Base de datos: contiene la definición lingüística de las variables.

2. Mecanismo de inferencia. Cada regla es interpretada como una implicación difusa, relaciona los conjuntos de entrada y salida para representar las reglas que definen el sistema, utilizando la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones. Consiste en tres componentes conceptuales:

- Reglas difusas
- Diccionario (con funciones de pertenencia)
- Mecanismo de raciocinio

Además en sistemas con entradas y/o salidas nítidas:

3. Interfaz de fuzzificación: Toma valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores "difusos" que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Dentro de este proceso se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.
4. Interfaz de defuzzificación: Realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia de valores utilizados en el proceso de control. Realización de métodos matemáticos simples mediante los cuales obtenemos un valor concreto de la variable de salida.

### 3. Modelo con Dinámica de Sistemas para cultivos agrícolas con análisis y selección de terrenos

Cuando se toma una decisión sobre cultivar o no en determinado lugar, se hace en función del resultado esperado con el paso del tiempo; resultado debido a la relación de un conjunto de parámetros y variables que se han identificado como determinantes del devenir del cultivo. Identificar los parámetros y variables del modelo y relacionarlos en términos de un sistema realimentado, así como como describir las relaciones de influencia entre los elementos del sistema en términos de expresiones matemáticas que representan a su vez raciocinios de carácter cuantitativos y de carácter cualitativo corresponde a una compleja tarea que permite el abordaje de la complejidad del fenómeno, en este caso del cultivo como se ilustra a continuación.

#### 3.1. Conceptualización Dinámico–Sistémica

Generalmente el momento inicial del modelado con Dinámica de Sistemas corresponde a la etapa de conceptualización Dinámico–Sistémica del fenómeno de interés, en la cual se propone una representación básica de la estructura de realimentación que determina su dinámica. Dicha estructura de realimentación se despliega en el tiempo a la manera de un espiral y constituye la hipótesis dinámica que habrá de verificarse en la medida que todo el proceso de modelado permita explicar de manera satisfactoria el fenómeno en estudio.

La hipótesis dinámica es una representación del sistema productivo agrícola donde se tienen en cuenta la producción de las plantas. Con el propósito de captar las interacciones dinámicas entre diferentes variables que influyen significativamente en la instalación y posterior producción de plantas. A continuación, se procede a definir las variables utilizadas para la construcción de la hipótesis dinámica (Figura 3).

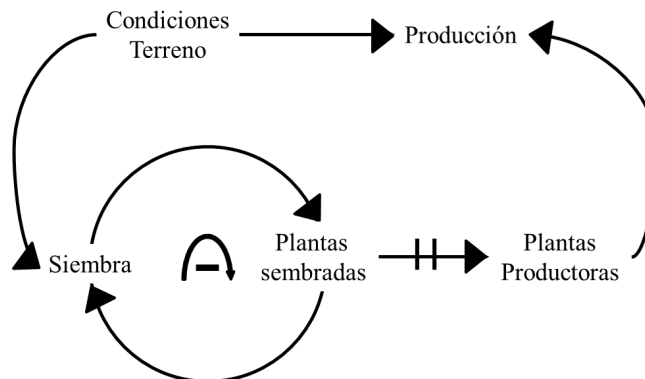











Figura 3. Hipótesis dinámica.

### 3.2. Diagrama de Flujos y Niveles<sup>1</sup>

El diagrama de Flujo–Nivel se realiza utilizando lógica difusa y lógica clásica para la selección del terreno, con el fin de comparar los resultados del análisis del terreno del modelo en donde se utiliza lógica clásica [18]. Los modelos que aquí se presentan se realizaron en el *software* Evolución [2]<sup>2</sup>. Los elementos con los cuales cuenta Evolución se presentan en el Cuadro 2.

Elemento	Nombre	Descripción
	Parámetro	Elemento del modelo independiente del sistema o constante propia de este que no varía durante la simulación.
	Nivel	Es una variable de estado. Representa la acumulación de flujos.
	Flujo	Es la variación de un nivel. Representa un cambio en el estado del sistema.
	FIS	Permite definir una variable en términos de un sistema de inferencia difuso.
	Retardo	Elemento que simula retrasos en la transmisión de la información o de material entre los elementos del sistema.
	Tabla	Representa una relación de no linealidad entre dos variables.
	Auxiliar	Cantidad con cierto significado para el modelador y con un tiempo de respuesta inmediato.
	Exógena	Variable cuya evolución es independiente de las del resto del sistema. Representa una acción del medio sobre el sistema.
	Canal de información	Es la transmisión de información que no necesita conservarse.

**Cuadro 2.** Elementos de Evaluación

El modelo tiene dos sectores el “crecimiento plantas” y “Factores de clima y exigencias de suelo”, la Figura 4 presenta el diagrama de Flujo – Nivel del

<sup>1</sup> Los modelos de lógica difusa y lógica clásica se encuentran disponibles en:

[www.dropbox.com/sh/vtjbiHy23te3nkn/AAD79x1iE5yh5PdHaic0JPS3a?dl=0](http://www.dropbox.com/sh/vtjbiHy23te3nkn/AAD79x1iE5yh5PdHaic0JPS3a?dl=0)

<sup>2</sup> Herramienta para el modelado y simulación con Dinámica de Sistemas *software*, desarrollado por grupo SIMON de Investigación en Modelado y Simulación de la Universidad Industrial de Santander. Disponible para descargar en: <http://simon.uis.edu.co>



LÓGICA DIFUSA CULTIVOS AGRÍCOLAS

crecimiento de las plantas teniendo en cuenta la selección de suelos para su instalación, en este modelo se utilizan controladores basados en lógica difusa y usando lógica clásica, para determinar la calidad del terreno, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y las exigencias del suelo.

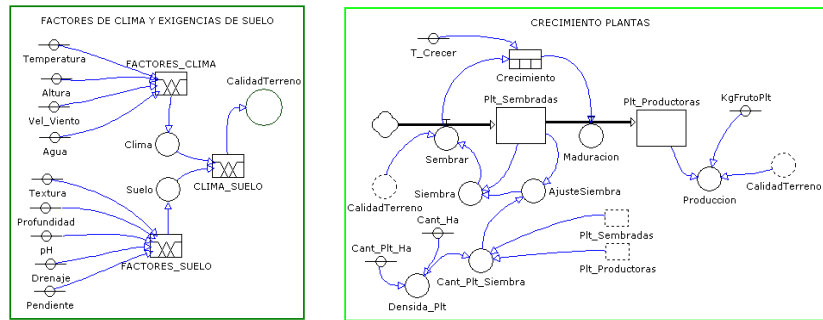


Figura 4. Modelo del crecimiento de plantas.

Para evaluar la calidad del terreno, teniendo en cuenta las los factores climáticos y las exigencias del suelo para un determinado cultivo, se debe diligenciar el Cuadro 3, en donde se presentan los parámetros técnicos principales de un cultivo, estos datos se pueden obtener directamente de los expertos o desde fuentes especializadas. Para este caso se tiene los parámetros técnicos del cultivo de cacao.

La selección de suelos se realiza utilizando lógica difusa y lógica clásica, con el fin de comparar y observar los resultados.

### 3.3. Diagrama de Flujos y Niveles usando lógica difusa y lógica clásica

**Construcción del controlador difuso para la selección de suelos de cultivos agrícolas.** Para determinar la calidad del terreno para un cultivo específico el experto en agroindustria debe considerar integralmente los diferentes factores del clima y las exigencias del suelo sean óptimas. En este sector se encuentran las variables que permiten indicar la calidad del terreno; con respecto a los factores climáticos se analizan la temperatura, altura, velocidad del viento y precipitación anual, y con respecto a las exigencias del suelo se analizan la textura, profundidad, pH, drenaje y pendiente. Con los resultados de estas dos variables se obtiene la calidad del terreno [12]. Para determinar qué tan apropiado es el terreno se dispone de la herramienta de lógica difusa. Por medio del componente FIS (lógica difusa) de Evolución, se obtienen resultados parecidos a los del razonamiento humano.

A continuación se presenta el ejemplo de la creación de los conjuntos difusos para la variable Temperatura, utilizando el componente FIS.

FACTORES CLIMÁTICOS			
Parámetros Técnico	Condiciones Óptimas	Condiciones Intermedias	Sin Potencial
Temperatura promedio anual °C	23 – 25	19 – 23 25 – 32	< 19 > 32
Precipitación anual (mm)	1500 – 2500	25 – 32	> 32
Altitud (m.s.n.m)	400 – 900	0 – 400 900 – 1200	> 1200
Velocidad máxima del viento (Km/H)	< 10	10 a 14	> 14

SUELOS			
Textura	Franco-Arcillosa	Franco-Arenosa	Arenosos-Arcillosos
Profundidad (m)	1.5	1.2 – 1.5	< 1.2
pH	6.0 – 6.5	5.0 – 6.0 6.5 – 7.5	< 5.0 > 7.5
Drenaje	Bueno	Moderado	Deficiente
Pendiente	0 – 9	9 – 12	> 13

Cuadro 3. Parámetros técnicos. Fuente: [5]

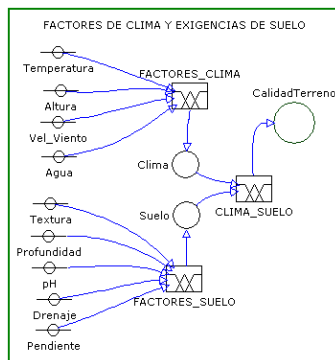


Figura 5. Controlador para selección del suelo usando lógica difusa.

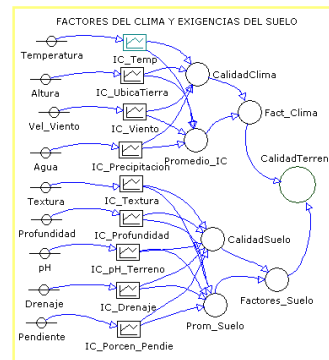


Figura 6. Controlador para la selección de suelo usando lógica clásica.

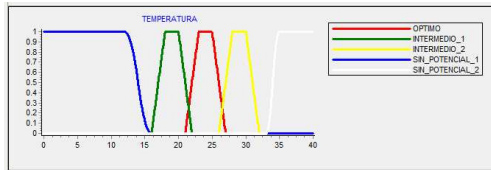
Este proceso, se debe realizar para cada uno de los parámetros técnicos, de esta forma se asegura que al introducir los datos de un terreno en el modelo, estos determinaran las condiciones del terreno.

Identificar los parámetros técnicos del cultivo

1	Parámetros Técnicos	Condiciones Óptimas	Condiciones Intermedias	Sin Potencial
	Temperatura Promedio Anual °C	23 – 25	19 – 23 25 – 32	< 19 > 32

Realizar los conjuntos difusos en el componente FIS de Evolución [17]

2



De acuerdo con la información del cuadro 4 se deben crear cinco conjuntos difusos. Después que se han creado todos los conjuntos difusos asociados, se procede a crear las reglas en donde se relacionan las variables.

**Cuadro 4.** Ejemplo de la creación de los conjuntos difusos de los parámetros técnicos

### 3.4. Ecuaciones

Formulada la hipótesis dinámica que soporta la construcción del modelo dinámico sistémico, en la Figura 4 se presenta el Diagrama de Flujos y Niveles, y sus respectivas ecuaciones matemáticas pueden ser consultadas en el Cuadro 5, el Cuadro 6 y el Cuadro 7.

Tipo de variable	Nombre de la variable	Unidades	Ecuación	valor inicial
Nivel	Plt_Sembradas	Plantas		0
	Plt_Productoras	Plantas		0
Flujo	Sembrar	Plantas/t	INT(IF(Terreno> 40,Siembra,0))	
	Maduración	Plantas/t	INT(Crecimiento)	
Auxiliar	Densidad_Plt	Plantas	Cant_Ha*Cant_Plt_Ha	
	Cant_Plt_Siembra	Plantas	IF(Densida_Plt=(Plt_Sembradas+Plt_Productoras),0, Densida_Plt-(Plt_Sembradas+Plt_Productoras))	
	Siembra	Plantas	IF(Densida_Plt<=Plt_Sembradas,0,AjusteSiembra)	
	AjusteSiembra	Plantas	IF((Cant_Plt_Siembra-Plt_Sembradas)> 0, (Cant_Plt_Siembra-Plt_Sembradas),0)	
	Producción	Kg	(Plt_Productoras*KgFrutoPlt)*[(Terreno)/100]	
Parámetro	Cant_Plt_Ha	Plantas/Ha	1000	
	Cant_Ha	Ha	1	
	T_Crecer	t	60	
	Kg_Fruto_Plt	Kg	5	
Retardo	Crecimiento	t	RETARDO(Sembrar, T_Crecer, T_Crecer-12, 0)	

**Cuadro 5.** Ecuaciones matemáticas para Diagrama de Flujos y Niveles

Tipo de variable	Nombre de la variable	Unidades	Ecuación	Valor Inicial
Auxiliar	Terreno	Adimensional	CLIMA_SUELO_NUEVA_SALIDA_1	
	Clima	Adimensional	FACTORES_CLIMA_NUEVA_SALIDA_1	
	Suelo	Adimensional	FACTORES_SUELO_NUEVA_SALIDA_1	
Parámetro	Temperatura	°C	25	
	Altura	m.s.n.m	100	
	Vel_Viento	Km/H	6	
	Agua	mm	2000	
	Textura	%	95	
	Profundidad	m	5	
	pH	Adimensional	6	
	Drenaje	%	95	
	Pendiente	%	1	
<b>Entradas</b>				
• Temperatura				
Universo de discurso: [0,40]				
	Nombre conjunto	Parámetros	Función	Membresía
	Óptimo	[21,23,25,27]	Trapezoidal	
	Intermedio 1	[16,18,20,22]	Trapezoidal	
	Intermedio 2	[26,28,30,32]	Trapezoidal	
	Sin potencial 1	[12,16]	Tipo Z	
	Sin potencial 2	[33,35]	Tipo S	
• Altura				
Universo de discurso: [0,1500]				
	Nombre conjunto	Parámetros	Función de membresía	
	Óptimo	[300,500,1100,1300]	Trapezoidal	
	Intermedio	[250,300,400,450]	Trapezoidal	
	Sin potencial	[1000,1500]	Tipo S	
• Vel_Viento				
Universo de discurso: [0,20]				
	Nombre conjunto	Parámetros	Función de membresía	
	Óptimo	[-1,0,10,11]	Trapezoidal	
	Intermedio	[10,12,14]	Triangular	
	Sin potencial	[14,20]	Tipo S	
• Agua				
Universo de discurso: [0,2600]				
	Nombre conjunto	Parámetros	Función de membresía	
	Óptimo	[1200,1300,2500,2600]	Trapezoidal	
	Intermedio	[900,1000,1100,1300]	Trapezoidal	
	Sin potencial	[-100,0,800,1000]	Trapezoidal	
<b>Salidas</b>				
• NUEVA_SALIDA_1				
Universo de discurso: [0,100]				
	Nombre conjunto	Parámetros	Función de membresía	
	Óptimo	[75,85,100,105]	Trapezoidal	
	Intermedio	[45,55,75,85]	Trapezoidal	
	Sin potencial	[-15,-5,40,50]	Trapezoidal	

**Cuadro 6.** Ecuaciones matemáticas para el Diagrama de Flujos y Niveles del controlador difuso

El modelo desarrollado aplicando Dinámica de Sistemas se ha diseñado con el propósito de ofrecer un espacio para la exploración y el aprendizaje acerca del crecimiento y producción de las plantas teniendo en cuenta las condiciones del terreno.

LÓGICA DIFUSA CULTIVOS AGRÍCOLAS

Tipo de variable	Nombre de la variable	Unidades	Ecuación Valor-Inicial
			<b>Entradas</b>
			• Textura
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [70,80,100,120] Trapezoidal
			Intermedio [40,50,70,80] Trapezoidal
			Sin potencial [0,60] Tipo Z
			• Profundidad
			Uníverson de discurso: [0,10]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [3,3.5,10,10.5] Trapezoidal
			Intermedio [1.1,1.8,2.8,3.5] Trapezoidal
			Sin potencial [0,1.8] Tipo Z
			• pH
			Uníverson de discurso: [0,10]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [3.5,4.5,7,8] Trapezoidal
			Intermedio 1 [1,1.5,4,4.3] Trapezoidal
			Intermedio 2 [7.3,7.5,8,8.2] Trapezoidal
			Sin potencial [0,1.5] Tipo Z
FACTORES_SUELO	Adimensional		• Drenaje
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [75,80,100,110] Trapezoidal
			Intermedio [40,50,70,80] Trapezoidal
			Sin potencial [0,60] Tipo Z
			• Pendiente
			Uníverson de discurso: [0,40]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [-2,0,9,11] Trapezoidal
			Intermedio [9,10,12,13] Trapezoidal
			Sin potencial [5,40] Tipo S
FIS			<b>Salidas</b>
			• NUEVA_SALIDA_1
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [70,80,100,110] Trapezoidal
			Intermedio [25,50,75] Triangular
			Sin potencial [-25,0,25,50] Trapezoidal
			<b>Entradas</b>
			• CLIMA
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [50,75,100,125] Trapezoidal
			Intermedio [25,50,75] Triangular
			Sin potencial [-25,0,25,50] Trapezoidal
			• SUELO
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [50,75,100,125] Trapezoidal
			Intermedio [25,50,75] Triangular
			Sin potencial [-25,0,25,50] Trapezoidal
			<b>Salidas</b>
			• NUEVA_SALIDA_1
			Uníverson de discurso: [0,100]
			Nombre conjunto Parámetros Función de membresía
			Óptimo [70,80,100,110] Trapezoidal
			Intermedio [25,50,75] Triangular
			Sin potencial [-25,0,25,50] Trapezoidal
CLIMA_SUELO	Adimensional		

Cuadro 7. Ecuaciones matemáticas para el Diagrama de Flujos y Niveles del controlador difuso



Sin embargo, al cambiar el valor de la pendiente por un dos, el cual es un valor que se encuentra en rango óptimo, se obtiene que la lógica clásica, considere el terreno óptimo; como se muestra en el segundo escenario.

En el tercer escenario, con condiciones óptimas se observa que aunque los presentan resultados similares, la lógica clásica da una puntuación máxima al terreno con un valor del 100 %, mientras que la lógica difusa aunque considera que aunque el terreno es muy bueno nunca llega a calificarlo con un valor del 100 %, tal como lo hace una persona, la cual siempre deja un margen de duda.

En el cuarto escenario, se consideran condiciones intermedias de clima y suelo, y mientras que el controlador clásico evalúa el terreno con un 85.7 %, el controlador difuso lo evalúa con un 76.7 %, en este escenario se debe reflexionar muy bien antes de realizar la instalación del cultivo, ya que aunque tiene condiciones intermedias, el rendimiento del cultivo no es tan favorable con respecto a la inversión que se debe hacer.

Para el escenario 5, en donde se tiene parametros tanto sin potencial, como intermedios y óptimos, los dos controladores nos indican que no es un terreno adecuado para el cultivo de cacao. La agricultura colombiana ha tenido un incremento no solo en los productos tradicionales de exportación como el banano sino también de nuevos exportables como palma, frutas y hortalizas. El crecimiento del mercado interno también ha contribuido a incrementar la producción en el caso del plátano, papa, frutas, entre otras; evidenciando el potencial de desarrollo al interior del país [22].

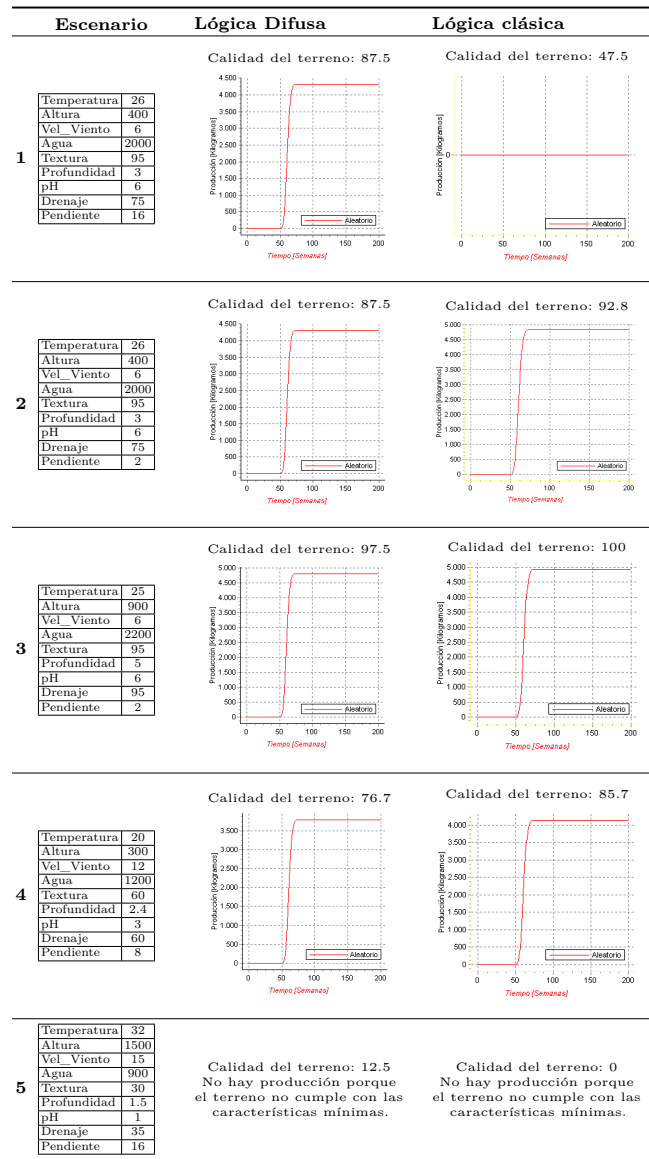
Como resultado el país ha presentado una producción agrícola creciente y diversificada. Del total de la producción durante el 2009, el 66 % perteneció a cultivos permanentes mientras que el 34 % restante a cultivos transitorios. Sin embargo, solo el 3 % del territorio es usado para fines agrícolas, y el potencial de expansión de tierras del país es alto, “según la FAO<sup>3</sup>, Colombia se ubica en el puesto 25 entre 223 países en donde se evalúa el potencial de expansión del área agrícola sin afectar el bosque natural. Este potencial de crecimiento según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural se estima en 10 millones de hectáreas, dentro de las que se encuentran áreas no aprovechadas y otras que han sido utilizadas sin atender criterios de vocación productiva” [27].

Actualmente, se necesita realizar estudio a los terrenos con el fin de conocer la vocación productiva, y es en ahí, en donde el modelado y simulación, permite a los productores y expertos de la agroindustria, analizar la calidad del terreno para un cultivo determinado por medio de controladores lógicos, con el fin de conocer que tan apropiado es el terreno para determinado cultivo y la relación entre la calidad del terreno y los rendimientos por hectarea.

## Conclusiones

La integración de la Dinámica de Sistemas y la Lógica Difusa constituyen una herramienta útil para abordar el análisis del terreno y como afecta la producción

<sup>3</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (Food and Agriculture Organization por sus siglas en Inglés)



Cuadro 9. Presentación de resultados de simulación. Fuente: Autor

de sistemas agrícolas. Ya que apoya al especialista en producción en la toma de decisiones argumentada a partir de simulaciones realizadas por el modelo dinámico. Lo cual, le permite experimentar de forma iterativa para evaluar posibles escenarios. Esta área ha demostrado ser una aproximación eficiente



para aplicaciones de ámbito muy variado: industrial, agrícola, medio ambiente, espacial, químico, navegación aérea y marítima, entre otras.

Aprovechando las características de la Lógica Difusa como que soporta datos imprecisos, es fácil de entender, flexible, se basa en el lenguaje humano y experiencia de expertos conocedores del problema; los actores involucrados participan en la construcción del modelo, aportando su conocimiento experto para la creación y posterior validación de las variables difusas que en el modelo representan la selección del terreno para un determinado cultivo.

La aplicación de la Lógica Difusa, permite abordar problemas complejos como es el control de sistemas no lineales. En este caso, se ha aplicado a la selección de suelos para cultivos agrícolas.

Finalmente, el uso de herramientas tecnológicas soportadas en dinámica de sistemas permite incrementar la productividad de estos sistemas productivos. Debido a que el modelo dinámico sistémico que soporta el funcionamiento de la herramienta tecnológica, complementa la racionalidad del productor.

## Referencias

1. Andrade Sosa, H.H. et al., 2010. Evolución: herramienta *software* para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. Revista de Dinámica de Sistemas.
2. Andrade Sosa, H.H. et al., 2001. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de unidad. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander.
3. Aracil, J., 1995. Dinámica de sistemas. Isdefe., Madrid.
4. Arango Serna, M.D., Adarme Jaimes, W. & Zapata Cortes, J.A., 2010. Gestión de abastecimiento - Logística con indicadores bajo incertidumbre, caso aplicado sector panificador Palmira.
5. Borrero, C., 2008. El cultivo de cacao en el Guaviare.
6. Brunet Cortina, I. & Alfonso Robaina, D., 2010. Lógica difusa aplicada a la toma de decisiones. Industrial XXXI.
7. Coyle, R.G., 1996. System Dynamics Modelling: A Practical Approach. Ilustrada., CRC Press, ed.
8. Danilo, O., Giraldo, M. & Buitrago, D.G., 2013. Lógica Difusa Aplicada al Control Local del Péndulo Invertido con Rueda de Reacción. , 18(4), pp.623-632.
9. F, O., Gayar, E. & Leung, P., 2001. A multiple criteria decision making framework for regional aquaculture development. European Journal of Operational Research. 133(3), pp.462-482.
10. F, O., Gayar, E. & Leung, P., 2000. ADDSS: a tool for regional aquaculture development. Aquacultural Engineering. 23(1), pp. 181-202.
11. Forrester, J., 2013. Industrial Dynamics. M. Publishing, ed.,
12. García Benítez, G. & Vera Estrada, C., 2010. Un modelo de sistema dinámico híbrido utilizando el enfoque de la lógica difusa. CIENCIA ergo sum., 17(2), pp. 165-175.
13. Gómez, U.E., Andrade, H.H. & Vásquez, C.A., Lineamientos Metodológicos para construir Ambientes de Aprendizaje en Sistemas Productivos Agropecuarios soportados en Dinámica de Sistemas. (Spanish). Información Tecnológica. 26(4), pp.125-135. Available at: 10.4067/S0718-07642015000400016.
14. González, C., 2012. Lógica Difusa: Una introducción práctica., p.29.

REVISTA ELEMENTOS - NÚMERO 6 - JUNIO DE 2016

15. De la Rosa, D., 2008. Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible. Ediciones., Madrid.
16. Londoño Ciro, L.A. et al., Uso de micromundos con Dinámica de Sistemas y lógica difusa para el diseño de evaluación de competencias en ciencias básicas en ingeniería, pp.1-8.
17. Machado Mendoza, G.D., González Pérez, C.E. & Andrade Sosa, H.H., 2006. Componente de sistema de inferencia difusa (FIS) para Evolución 3.5., Bucaramanga.
18. Martínez Rojas, N., Andrade Sosa, H.H. & Gomez Prada, U.E., 2011. Propuesta de un modelo con dinámica de sistemas como herramienta en el aprendizaje del eslabón de producción de la cadena productiva del cacao, p.15.
19. Matías, T.B. & Durán Vicente, M.I., Lógica borrosa.
20. Orji, I.J. & Wei, S., 2015. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry. *Computers & Industrial Engineering.*, 88, pp. 1-12.
21. Osorio Calderón, P.H., Andrade Sosa, H.H. & Gómez Prada, U.E., 2010. Propuesta de un modelo de simulación como herramienta en la justificación y comprensión de la toma de decisiones en la inversión pública. Un enfoque sistémico., Bucaramanga.
22. PROEXPORT Colombia, 2014. Análisis de exportaciones colombianas 2013.
23. Santos, M., 2011. Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI.*, 8(4), pp. 283-296.
24. Santos Peña, M. & Miranda Suescun, E., 2012. Aplicación de la lógica difusa en el ámbito de las energías renovables. *Revista Elementos*, 2(1), pp. 101-114.
25. Schaffernicht, M., *Dinámica de Sistemas: La búsqueda del rigor en el diseño de sistemas sociales.*
26. Sterman, J.D., 2000. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world.*, Available at: <http://www.lavoisier.fr/notice/frJWOAR6SA23WL00.html>.
27. Vélez, A. et al., 2011. *Sector Agroindustrial Colombiano.*, Bogotá, Colombia.

# REVISTA ELEMENTOS

## Información para los autores

Las instrucciones que a continuación se presentan tienen el propósito de estandarizar la presentación de artículos para ser sometidos al proceso de evaluación del comité editorial. Pretenden establecer una coherencia en la presentación que dé identidad y estructura a la publicación y, además, tener presente variables importantes en el momento de evaluar la calidad de los artículos por autoridades externas.

Se publicarán artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión, en su mayoría. Los mismos serán escritos tanto por investigadores de la institución como por profesionales externos. Aunque se pueden publicar artículos de cualquiera de los once tipos existentes, el mayor énfasis se hará en artículos de los tipos: 1, 2 y 3, de acuerdo con las definiciones dadas por Colciencias para su proceso de indexación. A saber:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta de manera detallada los resultados originales de un proyecto de investigación. La estructura por lo general utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y discusión.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación, desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento que surge de una investigación en la que se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones, publicadas o no, sobre un campo en ciencia o tecnología con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos cincuenta referencias.
4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales, preliminares o parciales, de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requiere de una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.
6. **Revisión de tema.** Documento que resulta de la revisión crítica de literatura sobre un tema en particular.
7. **Cartas al editor.** Posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del comité editorial, constituyen un aporte a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.
8. **Editorial.** Documento escrito por el editor, un miembro del comité editorial o un investigador invitado, sobre orientaciones en el dominio temático de la revista.
9. **Traducción.** Traducciones de textos clásicos o de actualidad, o transcripciones de documentos históricos o de interés particular en el dominio de publicación de la revista.
10. **Documento de reflexión que no es producto de una investigación.**
11. **Reseña bibliográfica.**
12. **Otros.**

## Temáticas

ELEMENTOS recibirá artículos escritos principalmente por docentes, investigadores, empresarios, investigadores externos (nacionales y extranjeros) y semilleros de investigación, quienes aportarán a los campos de conocimiento de la Ingeniería y Ciencias Básicas. Los textos pueden referirse, entre otros, a los siguientes temas de las disciplinas de Computación e Informática, Ingeniería Industrial, Ingeniería de Telecomunicaciones y Ciencias Básicas:

Infraestructura de *hardware* y *software*.  
Desarrollo y construcción de *software*.  
Análisis y diseño de algoritmos.  
Informática y sociedad.  
Nuevas tecnologías: NGN, *cloud computing*, virtualización, etc.  
Matemáticas puras (álgebra, análisis, topología, lógica)  
Matemáticas aplicadas (criptografía, procesamiento de señales, computación gráfica, bioinformática, etc)  
Matemáticas discretas.

Análisis multivariado y factorial.  
Series de tiempo.  
Educación matemática.  
Investigación de operaciones.  
Optimización.  
Minería de datos.  
Modelamiento, simulación y gestión de producción y de procesos.  
Cadenas productivas.  
Instrumentación virtual.  
Matemáticas financieras.  
Análisis de riesgo.

## Presentación de los artículos

### Originalidad de los textos

Los trabajos presentados deben ser inéditos y no pueden ser sometidos simultáneamente a consideración por parte de otras revistas. De la misma manera, no se recibirá ningún texto que haya sido publicado total o parcialmente en otra revista. El proceso editorial correspondiente sólo iniciará cuando se haga entrega del formato de presentación de artículos (disponible en [www.poligran.edu.co/editorial](http://www.poligran.edu.co/editorial)), en el cual los autores avalan su publicación en ELEMENTOS y asumen la autoría del mismo.

### Arbitraje

Los textos que han atravesado el proceso de entrega serán sometidos a un proceso de evaluación por parte de expertos (árbitros o pares académicos) bajo la modalidad doble ciego. Así como el par desconoce la identidad del autor, este desconoce la identidad sus evaluadores. Los árbitros son expertos en el área, seleccionados por el comité editorial y científico, que revisarán cada artículo y emitirán un dictamen sobre la viabilidad de su publicación.

Los autores serán notificados sobre los resultados de la evaluación y se les brindará un plazo para la entrega de los ajustes, determinado por el comité editorial. Este plazo puede variar de acuerdo a la cantidad de correcciones que requiera el texto. En caso de ser aceptado, los autores conocerán la decisión sobre el artículo y se adelantará el proceso editorial correspondiente.

**Recepción de artículos:** proceso abierto durante todo el año.

### Cierre editorial

Los artículos pueden ser entregados en la facultad a la que pertenece o pertenecen los respectivos docentes. En caso de que sean el resultado de una investigación institucional, serán recibidos en el Departamento de Investigación, si el artículo es de un autor externo se debe remitir a:

Departamento Editorial del Politécnico Grancolombiano Calle 57 No. 3-00 este Bloque A, primer piso Bogotá, Colombia Correo electrónico: <a href="mailto:ednorman@poligran.edu.co">ednorman@poligran.edu.co</a> , <a href="mailto:elementos@poli.edu.co">elementos@poli.edu.co</a> .
---

La editorial solo iniciará el proceso de edición con los artículos que cumplan con las características incluidas en este documento. En caso de que un artículo no clasifique, el editor enviará una comunicación formal al autor o a los autores por correo electrónico o carta impresa.

## Características de recepción de los artículos

1. Los trabajos que se propongan deben presentar resultados de investigación originales o reportes con experiencias relevantes y no deben estar publicados ni en proceso de evaluación para otras revistas.
2. Se recibirán artículos preferiblemente en formato  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ . Se debe usar la plantilla LNCS de Springer disponible en <http://www.springer.com/computer/lncs?SGWID=0-164-6-793341-0> donde también se encuentran plantillas de MS-Word para la presentación de los artículos.
3. Los artículos deben ser enviados en formato `tex` o `doc` y también su versión en `pdf`, al correo electrónico [elementos@poli.edu.co](mailto:elementos@poli.edu.co).
4. En la primera página debe estar la siguiente información: título del artículo (en español), datos del autor o los autores con los nombres y apellidos completos, fecha de recepción y aceptación del artículo, una corta reseña del autor o de los autores con una extensión máxima de 700 caracteres, correo electrónico del autor o de los autores, dirección, teléfono fijo, celular y filiación institucional.
5. En caso de contener mapas, cuadros, tablas, fórmulas o ilustraciones deben estar claramente descritas, y en orden. Se prefiere la entrega de gráficas externas en formatos vectoriales como `pdf` o `eps`, o también en formato `jpg` o `png`. Tener en cuenta que la revista es en blanco y negro y por tanto se debe usar escala de grises o convenciones adecuadas para este perfil. La información de texto, gráficos e imágenes debe ser presentada en una sola tinta y presentar la correspondiente autorización para su publicación. Los cuadros se enumerarán en forma consecutiva y lo mismo se hará con las figuras, que deben llevar una enumeración independiente.
6. El artículo debe traer un resumen en español con una extensión máxima de 700 caracteres, en el que se sinteticen los objetivos, métodos de estudio, resultados y conclusiones. Se deben adicionar las palabras clave (de 4 a 6).
7. Además, se debe presentar el resumen (*Abstract*) y las palabras clave (*Key Words*) en inglés. En caso de no contener esto, la editorial procederá a realizar la traducción por medio del Departamento Académico de Idiomas de la institución.
8. Se recibirán artículos presentados con el sistema de referencias correspondiente al ejemplo de uso `typeinst.zip` de la plantilla LNCS de Springer disponible en <http://www.springer.com/computer/lncs?SGWID=0-164-6-793341-0>. A continuación se ilustra dicho tipo de referencia:
  1. Foster, I., Kesselman, C.: The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Morgan Kaufmann, San Francisco (1999)

# ELEMENTOS MAGAZINE

## Information for authors

The instructions presented below are intended to standardize the presentation of articles to be evaluated by the editorial committee. These instructions establish coherence in the presentation that provides the publication with identity and structure. Also, they establish important variables when external authorities evaluate the quality of articles.

Mostly, articles of scientific and technological research, reflection and revision will be published. These will be written not only by researchers of the institution, but also by external professionals. Although articles of any of the eleven existing types can be published, the biggest emphasis will be made in articles of 1, 2, and 3 types, according to the definitions given by Colciencias for its indexation process. As follows:

1. **Scientific and Technological Research Article.** Document that presents, in detail, the original results of the research projects that were finished. Generally, the structure used has four important parts: introduction, methodology, results, and discussion.
2. **Reflection Article.** Document that presents the results of a research that was finished from an analytical, interpretative, or critical point of view of the author on a specific topic, based on original sources.
3. **Review Article.** Document that is the result of a finished research where the results of published and unpublished researches about science or technology are analyzed and systematized. This is in order to report development advances and tendencies. It is characterized by presenting a thorough bibliographic review of at least fifty references.
4. **Short Article.** Brief document that presents original, preliminary, or partial results of scientific or technological research that usually requires a quick spreading.
5. **Case Study.** Document that presents the results of a study about a particular situation in order to present the methodological and technical experiences considered in a specific case. It includes a commented systematic review of the literature about analog cases.
6. **Topic Review.** Document that results from the critical review of the literature of a specific topic.
7. **Letters to the Editor.** Critical, analytical, or interpretative positions about the documents published in the magazine, and that, according to the editorial committee, contribute to the discussion of the topic by the scientific community being referred to.
8. **Editorial.** Document written by the editor, a member of the editorial committee, or a guest researcher about orientations related to the thematic command of the magazine.
9. **Translation.** Translations of classic or current texts, or transcriptions of historical or of particular interest documents related to the publishing command of the magazine.
10. **Reflection document that is not product of a research.**
11. **Bibliographic Review.**
12. **Others.**

## Topics

ELEMENTOS will receive articles written mainly by teachers, researchers, entrepreneurs, external researchers (national and foreigner) and research seedbed, who will contribute to the knowledge fields of Engineering and Basic Sciences. The texts can refer, among others, to the following topics of Computing and Computer Science, Industrial Engineering, Telecommunication Engineering, and Basic Sciences:

Hardware and Software Infrastructure.  
Software Development and Construction.  
Algorithm Analysis and Design.  
Computer Science and Society.  
New Technologies: NGN, cloud computing, virtualization, etc.  
Pure Mathematics (algebra, analysis, topology, logic).  
Applied Mathematics (cryptography, sign processing, graphic computing, bioinformatics, etc.)  
Discrete Mathematics.  
Multi-varied and factorial analysis.

Time Series.  
Mathematical Education.  
Operation Research.  
Optimization.  
Data Mining.  
Production and Process Modeling, Simulation, and Management.  
Productive Chains.  
Virtual Implementation.  
Financial Mathematics.  
Risk Analysis

## Presentation of the articles

### Originality of the Text

All submitted papers must be unpublished and cannot be simultaneously submitted for consideration in other magazines. Similarly, ELEMENTOS will not receive any papers that have been whole or partially published in another journal. The respective editorial process will only start when the Article Presentation Form is received (available at: [www.poligran.edu.co/editorial](http://www.poligran.edu.co/editorial)). In this form, the authors approve the publication of the paper in the magazine and assume their authorship.

### Peer Review

Papers that have been delivered will be reviewed by experts (judges or academic peers) under the blind experiment mode. Both the peer and the author are unaware of each other's identity.

Judges are experts in the area, selected by the editorial and scientific committee. They review each paper and decide on the viability of its publication.

Authors will be notified about the results of the evaluation and will be given a deadline for delivering the adjustments. This term may vary according to the number of corrections required. If accepted, authors will be notified about the decision on the article and the editorial process will be carried out accordingly.

### Reception of the Articles

This process is open throughout the year.

### Editorial Closing Date

The articles can be handed in the school the respective teacher or teachers belong to. If they are the result of an institutional research, they will be received at the Research Department. If the article belongs to an external author, it should be sent to:

Departamento Editorial del Politécnico Grancolombiano Calle 57 No. 3-00 este Bloque A, primer piso Bogotá, Colombia Correo electrónico: <a href="mailto:ednorman@poligran.edu.co">ednorman@poligran.edu.co</a> , <a href="mailto:elementos@poli.edu.co">elementos@poli.edu.co</a> .
---

The editorial will start the editing process with the articles that fulfill all the characteristics included in this document. If an article is not classified, the editor will send a formal communication to the author or authors by email or printed letter.

## Reception characteristics of the articles

1. The articles to be proposed must present original research results or reports with relevant experiences and must not be published or being evaluated by other magazines.
2. Articles in  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  format will be preferred. For this, it is necessary to use the Springer **LNCS** template, available at <http://www.springer.com/computer/lncs?SGWID=0-164-6-793341-0> where MS-Word templates can also be downloaded.
3. The articles must be sent in **tex** or **doc** format along with their **pdf** version to the email [elementos@poli.edu.co](mailto:elementos@poli.edu.co).
4. The following information should be on the first page: title of the article (in Spanish), data of the author or authors with the full name, reception date, and article acceptance, a brief review of the author or authors with a maximum extension of 700 characters, email of the author or authors, address, landline number, cell phone number, and institutional relationship.
5. If the article has maps, charts, formulas, or drawings, they must be clearly described and in order. We prefer the delivery of external graphics in vectorial formats, such as **pdf** or **eps**, or also in **jpg** or **png** format. Keep into account that the magazine is black and white and for this reason, you should use gray scale or conventions suitable for this profile. The information of text, graphics, and images must be presented in one ink along with its corresponding publishing authorization. The charts and the figures will be numbered consecutively, but the latter will also have to have an independent numbering.
6. The article must have an abstract in Spanish with a maximum extension of 700 characters, where the objectives, study methods, results, and conclusions are synthesized. Keywords must be added (from 4 to 6.)
7. Also, the abstract and the keywords must be presented in English. If the article does not have this, the editorial will translate it through the Academic Language Department of the institution.
8. Articles presented with the reference system corresponding to the **typeinst.zip** use example of the Springer **LNCS** template, available at <http://www.springer.com/computer/lncs?SGWID=0-164-6-793341-0>, will be received. This type of reference is illustrated below:
  1. Foster, I., Kesselman, C.: The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Morgan Kaufmann, San Francisco (1999)