

ELEMENTOS

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA POLITÉCNICO GRANCOLOMBIANO
ELEMENTOS VOLUMEN 4 NÚMERO 1 - JUNIO DE 2014
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
BOGOTÁ, COLOMBIA



E L E M E N T O S S

VOLUMEN 4. NÚMERO 1. JUNIO DE 2014. 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 4. Número 1
Junio de 2014

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)
ULRICHS WEB Global Serials Directory
CENTRO DE INFORMACIÓN TECNOLÓGICA (CIT)- Chile
e-Libro / e-brary

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano.

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

Coordinación Editorial
César Augusto Quiñones Segura

Editorial Politécnico Grancolombiano

Editor
Eduardo Norman Acevedo

Coordinador de producción
David Ricciulli Duarte

Diseño y armada electrónica
Jaime Andrés Posada Restrepo

Corrección de estilo
npg.comunicaciones
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
Universidade de Costa Rica
Costa Rica
gabriela.barrantes@ecc.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/editorial



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

Índice general

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Editorial | 5 |
| Adimensionalización de una ecuación diferencial en un problema práctico de ingeniería | 9 |
| <i>Rogelio Alvarado, Miguel Angel Bernal, José Rafael Narváez, César Augusto Quiñones</i> | |
| Caracterización química del aceite esencial e identificación preliminar de metabolitos secundarios en hojas de la especie <i>raputia heptaphylla</i> (rutaceae) | 31 |
| <i>Carlos Andrés Coy Barrera, Jorge Parra, Luis Enrique Cuca Suárez</i> | |
| Estudio de costos de mantenimiento en helicópteros militares mediante la aplicación del costeo abc | 41 |
| <i>Mario Javier Giraldo, Diana Paola Tapiero Paredes, Mónica García Castillo</i> | |
| Comportamiento de la productividad en empresas del <i>cluster</i> plásticos establecidas en Bogotá D.C. dedicadas a la manufactura de envases, empaques y embalajes entre años 2003 a 2009 | 61 |
| <i>Andrés Giovanni Guarín Salinas</i> | |
| Modelado del comportamiento mecánico de unión <i>socket</i> – muñón, en amputados de miembro inferior | 77 |
| <i>José Alejandro Guerrero Vargas, Diego Pataquiva Wilches</i> | |
| XPS study for CZTS thin films growth by PVD co-evaporation method .. | 87 |
| <i>Mikel Fernando Hurtado Morales</i> | |
| Grado de cumplimiento y conocimiento de la resolución 371 de 2009, referente al manejo de medicamentos vencidos en la ciudad de Bogotá, Colombia | 97 |
| <i>Laura Ximena Lobo Berbesí, Diana Catalina Reina Galindo, Luis David Gómez Méndez</i> | |
| Evaluación del cambio en la concentración de dióxido de carbono en una corriente de gas mediante el uso de <i>Chlorella vulgaris</i> | 113 |
| <i>Iván Rodrigo Astros, María Camila Navarro, Adriana Inés Páez</i> | |
| Diseño de un fotobiorreactor <i>Airlift</i> a escala banco | 123 |
| <i>Diego Rubio Fernández, Jennifer Alexandra Sierra Herrera, Steven Ruiz Fonseca, Juan Andrés Sandoval Herrera</i> | |

Caracterización fisicoquímica del sistema Mo/CuInS₂/Zn(O,OH)S/ZnO
por medio de espectroscopía fotoelectrónica XPS y AES 145
William A. Vallejo, Carlos E. Diaz-Urbe, Mikel Hurtado

Editorial

La Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano presenta el cuarto número de la revista Elementos. Esta edición se realiza con la colaboración de reconocidos grupos de investigación de universidades de primera línea a nivel nacional: Universidad Nacional de Colombia, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad de América, Universidad Javeriana, Universidad del Atlántico y Politécnico Grancolombiano. Así mismo este número es diverso en la naturaleza de los temas que se abordan: modelado y simulación, física y química de materiales, bioremediación, productos naturales e ingeniería industrial en el campo del estudio de mercados y logística. Esta diversidad obedece a la realidad de los campos de investigación que en la actualidad son abordados por los diferentes grupos de investigación de las facultades de ciencias básicas e ingeniería a nivel nacional.

El profesor Miguel Bernal y sus colaboradores presentan un caso de aplicación del teorema Pi de Buckingham, tema que se ha venido trabajando en otras publicaciones de primer orden mundial como el *European Journal of Physics* y del cual el trabajo que presenta en nuestra revista es una continuación.

El ingeniero José Alejandro Guerrero hace uso de varias herramientas computacionales para el diseño de una interfaz muñón - *socket* en pacientes que han sufrido amputaciones. Este trabajo busca mejorar la calidad de vida del paciente y es un esfuerzo por lograr materiales de mejor calidad y desempeño.

En el campo de la Ciencia e ingeniería de materiales, el Doctor en Ciencias Mikel Hurtado presenta estudios avanzados de deposición de Kesteritas, un tipo de materiales que esta revolucionando las celdas solares y que será seguramente, en un futuro cercano, un material protagonista en la producción industrial de las mismas. En el mismo campo el doctor William Vallejo y sus colaboradores aplican técnicas especializadas de caracterización de materiales con aplicaciones en celdas solares, en este caso, referido a la capa absorbente de celdas basadas en CuInSe, material que en la actualidad es fuertemente estudiado en este campo.

En el campo de la biotecnología la profesora Adriana Páez nos presenta un interesante caso de uso de microalgas nativas de Colombia en la disminución de la concentración de CO₂ un gas de efecto invernadero del que todos conocemos sus efectos. Por otra parte el Profesor Diego Rubio, trabajando en el mismo campo e incluso con el mismo tipo de microalgas, propone un modelo de fotobiorreactor para la producción de biomasa con diferentes aplicaciones industriales.

En esta edición, los ingenieros industriales traen un estudio de costos de mantenimiento de helicópteros militares por parte del Ingeniero Mario Javier Giraldo, el profesor Luis David Gómez de la Universidad Javeriana aborda un problema crítico: la disposición de medicamentos vencidos, mostrándonos que menos del 20 % de la población ha sido cubierto por los planes de divulgación del

gobierno. Finalmente el ingeniero Andrés Giovanni Guarín hace un interesante y juicioso análisis del comportamiento de la productividad en empresas del clústers de plásticos determinando relaciones de productividad con factores como el capital, la fuerza de trabajo y la apropiación tecnológica.

Por último el Doctor Carlos Coy nos muestra la caracterización química de un aceite esencial de una especie nativa con el objetivo de profundizar en el conocimiento de la composición química de plantas que pueden tener a futuro usos como medicamentos de origen natural.

Además de las bases de datos en la que ya nos encontrábamos indexados en el número 3 (LATINDEX, e-libro ebrary y Ulrichs web) a partir de esta entrega contaremos con la indexación en el Chemical Abstracts Service de la American Chemical Society (con mas de 8000 revistas, reportes y nuevos libros), el índice bibliográfico Nacional PUBLINDEX y en el Centro de Información Tecnológica de Chile CIT. Este esfuerzo que hemos realizado significa un importante logro que permite aumentar la visibilidad e impacto de los artículos publicados por nuestros autores.

La revista Elementos estará complacida en contar con su participación en los números futuros poniendo a su disposición toda la ayuda, asesoría y soporte de nuestro departamento editorial.

Junio de 2014

Cesar Augusto Quiñones Segura
Editor
Politécnico Grancolombiano
caquinones@poligran.edu.co



Adimensionalización de una ecuación diferencial en un problema práctico de ingeniería

Rogelio Alvarado*, Miguel Angel Bernal**, José Rafael Narváez***, César Augusto Quiñones†

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano

FECHA DE ENTREGA: 6 DE NOVIEMBRE DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 9 DE MARZO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 10 DE MAYO DE 2014

Resumen En este trabajo se muestra la aplicación del teorema Pi de Buckingham para obtener parámetros adimensionales en el proceso de adimensionalizar una ecuación y una consecuencia de esto para el caso particular de un amortiguador elástico conectado al parachoques de un automóvil en la búsqueda de valores óptimos para las constantes de elasticidad del resorte κ y de atenuación del amortiguador c . Problema estudiado por el ingeniero D. A. Peters en su artículo *Optimum Spring-Damper Design for Mass Impact*[1]. Por claridad con el lector nos permitimos expandir algunos de los cálculos propuestos en la mencionada publicación y el uso del lenguaje de programación C++ para implementar el método de Newton-Raphson. Finalmente se muestra el instrumento virtual Labview 8.5 que se construyó para el sistema con el objetivo de obtener los mejores valores de κ y c .

Abstract This work shows an application of Buckingham Pi theorem to obtain dimensionless parameters from a differential equation used to model an elastic damper system attached to the bumper of a car. Although the original problem was studied by D. A. Peters in his article *Optimum Spring-Damper Design for Mass Impact* [1], we present to the reader expanded calculations, and computational tools such as C++ and Labview 8.5 are used to obtain optimal values for the spring constant κ , and the damping constant c of the system as a function of the impact speed, mass vehicle and expected displacement of the bumper.

Palabras Clave: Teorema Pi de Buckingham, parámetros adimensionales, instrumento virtual.

Keywords: Buckingham Pi theorem, dimensionless parameters, virtual instrument.

* ralvarad@poligran.edu.co

** mabernal@poligran.edu.co

*** jnarvaez@poligran.edu.co

† caquinones@poligran.edu.co

1. Introducción

Como agente fundamental en el desarrollo de una sociedad el automóvil es uno de los mayores aportes de la ingeniería. Su papel es vital desde el punto de vista económico y cultural debido a la siempre creciente necesidad de un transporte rápido, seguro, confortable, económico y masivo.

El avance tecnológico, el descubrimiento de nuevos materiales y las exigencias de altos estándares de calidad en seguridad, confort y desempeño impactan directamente muchos aspectos de la industria automotriz, lo que hace primordial el continuo estudio e investigación para lograr mejoras en estos aspectos. Pero la seguridad, confort y eficiencia dependen en gran medida de los sistemas de amortiguamiento. El profesor D. A. Peters en su artículo *Optimum Spring-Damper Design for Mass Impact*[1] optimiza los parámetros del resorte y amortiguador de un automóvil, resolviendo la ecuación diferencial asociada a este sistema para el caso de pequeños impactos.

2. Descripción del modelo amortiguador-elástico

El principal objetivo del modelo amortiguador-elástico en el parachoques de un automóvil, figura 1, radica en que al momento del choque frontal la fuerza máxima del impacto sobre el vehículo se atenúe lo máximo posible para un valor mínimo del desplazamiento del parachoques, es decir lograr que una porción significativa de la energía liberada en el choque sea disipada en el amortiguador-elástico, lo que permite que el vehículo sufra menos daños en su estructura protegiendo la integridad de los ocupantes.

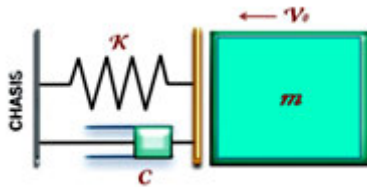


Figura 1. Modelo físico del amortiguador elástico.

El modelo matemático que se obtiene al aplicar las leyes de la mecánica al problema físico planteado es una ecuación diferencial de segundo orden con coeficientes indeterminados κ y c , relacionados con la elasticidad del resorte y el coeficiente de fricción del amortiguador respectivamente.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{\kappa}{m}x = 0. \quad (1)$$

Las condiciones iniciales del problema son:

- En el momento del impacto ($t = 0$), el parachoques se encuentra en su posición de equilibrio $x = 0$.
- En el momento del impacto ($t = 0$), la velocidad del cuerpo que choca es $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v_0$.

Bajo estas condiciones el objetivo[1] es determinar los parámetros κ y c que permiten que el valor máximo de F sea un mínimo para un desplazamiento x_m del parachoques lo más pequeño posible.

2.1. Teorema PI de Buckingham

Como todos los términos de una ecuación física son dimensionalmente homogéneos, es decir todos tiene la misma dimensión física, es posible dividir cada uno por las cantidades apropiadas para obtener una ecuación adimensional y para este caso particular con la ventaja que el número de parámetros se reduce a sólo uno, ξ . El proceso anterior genera un conjunto de parámetros adimensionales conocidos como los Pi's del problema[2][3] y se pueden obtener de forma metódica haciendo uso del teorema Pi de Buckingham de amplia aplicación en ingeniería y ciencias[4][5].

“El teorema Pi de Buckingham¹ [3] establece que dadas q_1, q_2, \dots, q_n , n variables involucradas en un problema particular, debe existir una relación funcional de la forma:

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0. \quad (2)$$

Entonces, siempre se pueden combinar estas n variables para formar exactamente $n - j$ variables adimensionales independientes, donde j es el rango de la matriz dimensional[3]. Cada parámetro adimensional es llamado un “número Π ”. Así la ecuación (2) puede ser escrita como la relación funcional:

$$\phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-j}) = 0. \quad (3)$$

Se puede verificar rápidamente que estos parámetros adimensionales no son únicos. Sin embargo, $(n - j)$ de ellos son independientes y forman un conjunto completo[3].

Para implementarlo se proponen los siguientes pasos[2][3]: Realizar un lista de las variables dinámicas del problema. Este número se designa como n . Listar las dimensiones fundamentales necesarias para describir las n variables dinámicas. A este número de variables fundamentales se denota con j . Del conjunto de n variables dinámicas se escogen j de ellas, que van a reemplazar las j unidades fundamentales. Las j nuevas variables dinámicas, se consideran como las nuevas fundamentales del problema a tratar. Quedan otras $n - j$ variables dinámicas, las cuales se podrían expresar en función de las j nuevas variables fundamentales. El procedimiento a seguir consiste en hallar un parámetro adimensional asociado a cada una de las $n - j$ variables dinámicas, el cual se conoce como Π_i . Para ello

¹ Tomado textualmente de [4]

se define estos Π_i de la siguiente forma:

$$\Pi_i = V_{Di} \prod_{k=1}^j V_{Fk}^{a_k}, \quad \text{con: } i = 1, 2, \dots, n - j. \quad (4)$$

Donde V_D son las variables dinámicas y V_F son las variables dinámicas que hacen las veces de variables fundamentales, y los a_k se escogen de tal forma que Π_i sea adimensional. Finalmente se puede establecer una relación entre los Π_i , de la forma:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-j}).'' \quad (5)$$

Para ver una aplicación relacionada con la física nuclear revisar[4][5].

Al aplicar el teorema Pi al problema del artículo:

VARIABLES DINÁMICAS PRESENTES EN EL PROBLEMA

1. La masa del objeto: m .
2. Constante de elasticidad del resorte: κ .
3. Coeficiente de disipación del amortiguador: c .
4. Desplazamiento de la masa: x .
5. Velocidad con que se aproxima la masa: v .
6. Fuerza sobre la masa: F .
7. Tiempo en que ocurre el evento: t .

Número de variables dinámicas: $n = 7$.

MAGNITUDES FUNDAMENTALES RELEVANTES EN EL PROBLEMA

1. Masa: M .
2. Longitud: L .
3. Tiempo: T .

Número de magnitudes fundamentales: $j = 3$.

Aplicación del Teorema II

De acuerdo al teorema II el número de parámetros adimensionales a buscar es: $m = n - j = 7 - 3 = 4$. Se propone reemplazar m , κ y v en término de las magnitudes fundamentales y por lo tanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_1 \rightarrow x, \\ \Pi_2 \rightarrow F, \\ \Pi_3 \rightarrow t, \\ \Pi_4 \rightarrow c. \end{array} \right.$$

2.2. Cálculo de Π_1

Π_1 es el parámetro adimensional relacionado con el desplazamiento, así:

$$\Pi_1 = x \cdot m^a \cdot \kappa^b \cdot v^c, \quad (6)$$

descomponiendo cada variable dinámica en sus correspondientes magnitudes fundamentales:

$$\Pi_1 = L \cdot M^a \cdot \left(\frac{M}{T^2}\right)^b \cdot \left(\frac{L}{T}\right)^c = L \cdot M^a \cdot \frac{M^b}{T^{2b}} \cdot \frac{L^c}{T^c},$$

agrupando:

$$\Pi_1 = L^{1+c} \cdot M^{a+b} \cdot T^{-2b-c}.$$

Garantizar adimensionalidad implica que:

$$\begin{aligned} 1 + c &= 0, \\ a + b &= 0, \\ -2b - c &= 0, \end{aligned}$$

que al solucionar lleva a:

$$\begin{aligned} c &= -1, \\ a &= -\frac{1}{2}, \\ b &= \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación (6), se obtiene:

$$\Pi_1 = x \cdot m^{-1/2} \cdot \kappa^{1/2} \cdot v^{-1},$$

así:

$$\Pi_1 = \frac{x}{v} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{m}}.$$

Para valores típicos de x y v y considerando que $\omega = \sqrt{\kappa/m}$, finalmente:

$$\Pi_1 = \frac{x_m \omega}{v_0}. \quad (7)$$

Calcular los otros Π es repetir el procedimiento anterior, por lo tanto sólo se dirá que cada uno de estos Π 's corresponde a una magnitud relevante del problema respectivamente. De especial importancia para este problema son los tres primeros Π 's, que se relacionan con variables que cambian en el tiempo y el tiempo mismo. Para reescribir la ecuación (1) con el fin que quede adimensional, se renombran

los Π 's de tal forma que la notación parezca más natural, así::

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{\omega}{v_0}x = z, \\ \Pi_2 &= \omega t = \tau, \\ \Pi_3 &= \frac{Fx_m}{mv_0^2} = \bar{F}, \\ \Pi_4 &= \frac{c}{2\sqrt{\kappa m}} = \xi,\end{aligned}\tag{8}$$

En esta nueva notación: z juega el papel de x , el desplazamiento, pero sin dimensiones, τ el del tiempo t y \bar{F} el de la fuerza.

3. Adimensionalización de la ecuación de movimiento

Aplicando la regla de la cadena y teniendo en cuenta las relaciones funcionales dadas en la ecuación (8), se calcula:

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = z^*,$$

al calcular las derivadas se llega a:

$$z^* = \frac{\omega}{v_0} \dot{x} \frac{1}{\omega} = \frac{\dot{x}}{v_0},$$

por lo tanto:

$$\dot{x} = v_0 z^*,\tag{9}$$

Para calcular la segunda derivada se debe tener en cuenta que z^* depende de \dot{x} (ecuación 9) y esta depende del tiempo t y por las relaciones funcionales de la ecuación (8) el tiempo depende de τ , así:

$$\frac{\partial z^*}{\partial \tau} = \frac{\partial z^*}{\partial \dot{x}} \cdot \frac{\partial \dot{x}}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = z^{**},$$

derivando:

$$z^{**} = \frac{1}{v_0} \ddot{x} \frac{1}{\omega} = \frac{\ddot{x}}{\omega v_0},$$

por lo tanto:

$$\ddot{x} = \omega v_0 z^{**}.\tag{10}$$

Despejando x la primera ecuación de (8), obtiene:

$$x = \frac{v_0}{\omega} z,\tag{11}$$

y reemplazando (11), (9) y (10) en la ecuación (1), lleva a:

$$\omega v_0 z^{**} + \frac{c}{m} z^* + \omega^2 \frac{v_0}{\omega} z = 0,$$

que después de cancelar queda:

$$\omega z^{**} + \frac{c}{m} z^* + \omega z = 0,$$

dividiendo entre ω , se obtiene:

$$z^{**} + \frac{c}{m\omega} z^* + z = 0,$$

y reemplazando ω por $\sqrt{\kappa/m}$, la ecuación anterior se transforma en:

$$z^{**} + \frac{c}{\sqrt{\kappa m}} z^* + z = 0,$$

note que al multiplicar y dividir el segundo término aparece de forma natural Π_4 , así:

$$z^{**} + 2\xi z^* + z = 0, \quad (12)$$

que es la equivalente adimensional a la ecuación dinámica del problema (ecuación 1), que además tiene la ventaja de tener un sólo parámetro[1]. Se puede verificar muy rápido que las condiciones iniciales son:

$$\begin{aligned} z(0) &= 0 \\ z^*(0) &= 1. \end{aligned} \quad (13)$$

4. Solución y análisis

Para resolver la ecuación 12 se aplican los procedimientos tradicionales que se enseñan en los cursos de ecuaciones diferenciales. Así, la ecuación de índices de (12) es:

$$r^2 + 2\xi r + 1 = 0,$$

con solución:

$$r = -\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}, \quad (14)$$

y se diferencian tres casos:

1. Si $\xi < 1$, entonces: $r = -\xi \pm i\sqrt{1 - \xi^2}$.
2. Si $\xi = 1$, entonces: $r = -\xi$.
3. Si $\xi > 1$, entonces: $r = -\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}$.

Caso 1: Exponenciales complejos

Con $\xi < 1$ la solución de la ecuación 12 es:

$$z(\tau) = a_1 e^{(-\xi + i\sqrt{1 - \xi^2})\tau} + a_2 e^{(-\xi - i\sqrt{1 - \xi^2})\tau},$$

factorizando,

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} \left(a_1 e^{i\sqrt{1 - \xi^2}\tau} + a_2 e^{-i\sqrt{1 - \xi^2}\tau} \right),$$

usando la identidad de Euler,

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} a_1 \left[\cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) + i \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right] \\ + e^{-\xi\tau} a_2 \left[\cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - i \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right],$$

agrupando,

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} \left[(a_1 + a_2) \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) + i(a_1 - a_2) \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right],$$

renombrando las constantes:

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} \left[A_1 \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) + iA_2 \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right],$$

para que se cumpla la condición $z(0) = 0$ es claro que A_1 debe ser cero, por lo tanto:

$$z(\tau) = iA_2 e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right),$$

para encontrar el valor de A_2 , se hace uso de la condición inicial $z^*(0) = 1$, así:

$$z^*(0) = iA_2 \left[-\xi e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \sqrt{1-\xi^2} \right] \Big|_{\tau=0} \\ = iA_2 \sqrt{1-\xi^2} = 1,$$

despejando,

$$A_2 = \frac{1}{i\sqrt{1-\xi^2}},$$

reemplazando en la solución:

$$z(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right), \quad (15)$$

Caso 2

Con $\xi = 1$ la solución de la ecuación 12 es:

$$z(\tau) = a_1 e^{-\xi\tau} + a_2 \tau e^{-\xi\tau},$$

en la cual es inmediato que $a_1 = 0$ si se desea asegurar que $z(0) = 0$, luego la solución se reduce a:

$$z(\tau) = a_2 \tau e^{-\xi\tau},$$

derivando, evaluando en $\tau = 0$ e igualando a 1,

$$z^*(0) = a_2 \left(e^{-\xi\tau} - \tau \xi e^{-\xi\tau} \right) \Big|_{\tau=0} = a_2 = 1,$$

que concluye inmediatamente que:

$$a_2 = 1,$$

reemplazando en la solución:

$$z(\tau) = \tau e^{-\xi\tau}. \quad (16)$$

caso 3

Con $\xi > 1$ la solución de la ecuación 12 es:

$$z(\tau) = a_1 e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\tau} + a_2 e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\tau},$$

factorizando:

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} \left(a_1 e^{\sqrt{\xi^2 - 1}\tau} + a_2 e^{-\sqrt{\xi^2 - 1}\tau} \right),$$

el lector puede comprobar que cambiando $a_1 = \frac{A_1 + A_2}{2}$ y $a_2 = \frac{A_1 - A_2}{2}$, la solución se puede reescribir como:

$$z(\tau) = e^{-\xi\tau} \left[A_1 \cosh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right) + A_2 \sinh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right) \right]$$

para asegurar que se cumpla que $z(0) = 0$ se debe tomar $A_1 = 0$, luego:

$$z(\tau) = A_2 e^{-\xi\tau} \sinh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right),$$

el valor de A_2 se obtiene al hacer $\dot{z}^*(0) = 1$, así:

$$\begin{aligned} \dot{z}^*(0) &= A_2 \left[-\xi e^{-\xi\tau} \sinh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right) + e^{-\xi\tau} \cosh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right) \sqrt{\xi^2 - 1} \right] \Big|_{\tau=0} \\ &= A_2 \sqrt{\xi^2 - 1} = 1, \end{aligned}$$

luego:

$$A_2 = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 - 1}}.$$

reemplazando en la solución,

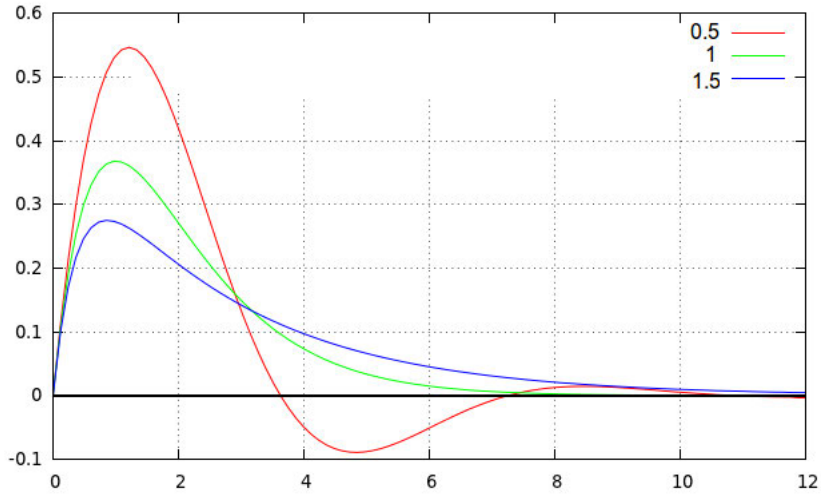
$$z(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{-\xi\tau} \sinh \left(\sqrt{\xi^2 - 1}\tau \right). \quad (17)$$

Al graficar las soluciones tomando para ello tres valores dentro de cada intervalo, se puede observar el siguiente comportamiento,

- El pico de la curva verde ($\xi_v = 1$) es fijo y tiene un valor entre 0.3 y 0.4.
- El pico de la curva azul ($\xi_a = 1.5 > 1$) es inferior al de la curva verde y tiende al valor de la verde ($z_a \rightarrow z_v$) cuando $\xi_a \rightarrow 1^+$.
- El pico de la curva roja ($\xi_r = 0.5 < 1$) es superior al de la curva verde y tiende al valor de la verde ($z_r \rightarrow z_v$) cuando $\xi_r \rightarrow 1^-$.

De lo anterior se concluye directamente que el máximo de z se consigue cuando $\xi < 1$ y la solución del problema es la ecuación 15. Para encontrar este valor máximo se toma la derivada de la solución (ecuación 15) y se iguala a cero. En detalle:

$$\frac{dz}{d\tau} = 0,$$



es decir:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) \right) = 0,$$

derivando,

$$\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \left[-\xi e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) + e^{-\xi\tau} \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau) \sqrt{1-\xi^2} \right] = 0,$$

es cero lo que está dentro del paréntesis rectangular, así:

$$-\xi e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) + \sqrt{1-\xi^2} e^{-\xi\tau} \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau) = 0,$$

factorizando el exponente y resolviendo,

$$-\xi \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) + \sqrt{1-\xi^2} \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau) = 0,$$

lo que lleva a:

$$\frac{\sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau)}{\cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau)} = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi},$$

y por lo tanto:

$$\tan(\sqrt{1-\xi^2}\tau) = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}, \quad (18)$$

o mejor:

$$\sqrt{1-\xi^2}\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right). \quad (19)$$

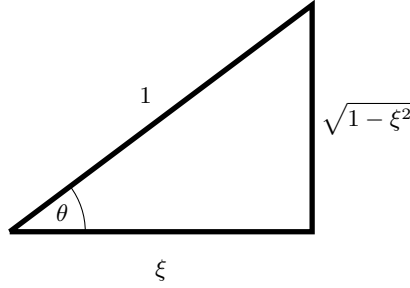


Figura 2. Triángulo que se construye a partir de la ecuación (18).

De acuerdo a la ecuación (18), los lados del triángulo que sugiere la tangente permiten deducir que la hipotenusa es 1, ver figura (2),

temporalmente se llamará θ a $\sqrt{1 - \xi^2}\tau$. De acuerdo al dibujo se puede verificar que:

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{1}, \quad \text{por lo tanto} \quad \theta = \sqrt{1 - \xi^2}\tau = \sin^{-1} \sqrt{1 - \xi^2},$$

así mismo,

$$\cos \theta = \frac{\xi}{1}, \quad \text{por lo tanto} \quad \theta = \sqrt{1 - \xi^2}\tau = \cos^{-1} \xi,$$

y por lo tanto son válidas las siguientes relaciones:

$$\sqrt{1 - \xi^2}\tau = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) = \sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right) = \cos^{-1} (\xi),$$

así el tiempo en que z alcanza su valor máximo es:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) = \tau_f, \quad (20)$$

que es particularmente útil escribirlo como:

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right). \quad (21)$$

Reemplazando este tiempo en la ecuación (15),

$$z(\tau_f) = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\tau_f} \sin \left(\sqrt{1 - \xi^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right) \right),$$

cancelando se llega finalmente a:

$$z(\tau_f) = z_m = e^{-\xi\tau_f}. \quad (22)$$

La fuerza normalizada se obtiene de la ecuación (12),

$$\bar{F} = -\dot{z}^* = 2\xi \dot{z}^* + z,$$

o mejor:

$$\bar{F} = -z_m \dot{z}^* = z_m (2\xi \dot{z}^* + z). \quad (23)$$

Antes de continuar se debe recordar que ξ está restringido a valores entre [0 y 1].

Optimizando ξ

La ecuación (23) permite encontrar el mayor valor de la fuerza para cualquier $0 < \xi < 1$ y de todos estos valores interesa el mínimo. De acuerdo al problema este valor máximo de \bar{F} está en el intervalo de tiempo (normalizado) $\tau = 0$ y $\tau = \tau_f$, al inicio y final del recorrido de la masa. Entonces, en algún punto intermedio ($\tau = \tau_m$) se cumple que:

$$\frac{d\bar{F}}{d\tau} = 0,$$

se debe recordar que las condiciones iniciales a la que se está sometido el sistema, son: $z(0) = 0$ y $\dot{z}^*(0) = 1$ y por consiguiente al final de recorrido: $z(\tau_f) = z_m$ y $\dot{z}^*(\tau_f) = 0$.

Para calcular la fuerza en estos valores extremos, se hará uso de la ecuación (23), así:

- Al inicio del recorrido ($\tau = 0$),

$$\bar{F}(0) = z_m (2\xi \dot{z}^*(0) + z(0)) = z_m (2\xi \cdot 1 + 0) = 2\xi z_m.$$

- Al final del recorrido ($\tau = \tau_f$),

$$\bar{F}(\tau_f) = z_m (2\xi \dot{z}^*(\tau_f) + z(\tau_f)) = z_m (2\xi \cdot 0 + z_m) = z_m^2.$$

El mayor valor de la fuerza dentro del recorrido se encuentra calculando el tiempo τ_m ($0 < \tau_m < \tau_f$) para el cual esta toma un valor máximo, y por lo tanto:

$$\frac{d\bar{F}}{d\tau} = \bar{F}^* = 0,$$

a partir de (23), lo anterior queda:

$$\bar{F}^* = z_m (\dot{z}^* + 2\xi \dot{z}^*) = 0, \quad (24)$$

derivando (15)

$$\dot{z}^*(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \left[-\xi e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) + \sqrt{1-\xi^2} e^{-\xi\tau} \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau) \right]$$

distribuyendo,

$$\dot{z}^*(\tau) = -\xi \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right). \quad (25)$$

Para facilitar el cálculo de la segunda derivada, la ecuación anterior se reescribe como:

$$\dot{z}^*(\tau) = -\xi z + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right),$$

ahora se procede a calcular la segunda derivada, entonces:

$$\ddot{z}^{**}(\tau) = -\xi \dot{z}^* - \xi e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - \sqrt{1-\xi^2} e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right)$$

se amplifica el segundo término, luego:

$$\ddot{z}^{**}(\tau) = -\xi \dot{z}^* - \xi e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - (1-\xi^2) \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right),$$

que gracias a (15) se puede reescribir como:

$$\ddot{z}^{**}(\tau) = -\xi \dot{z}^* - \xi e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - (1-\xi^2) z, \quad (26)$$

reemplazando (25) y (26) en (24),

$$\begin{aligned} z_m \left[\left(-\xi z + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right) \right. \\ \left. + 2\xi \left(-\xi \dot{z}^* - \xi e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - (1-\xi^2) z \right) \right] = 0, \end{aligned}$$

distribuyendo,

$$\begin{aligned} z_m \left[-\xi z + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right. \\ \left. - 2\xi^2 \dot{z}^* - 2\xi^2 e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - 2\xi z - 2\xi^2 z \right] = 0, \end{aligned}$$

agrupando los términos con coseno,

$$z_m \left[-\xi z + (1-2\xi^2) e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - 2\xi^2 \dot{z}^* - 2\xi z - 2\xi^2 z \right] = 0,$$

agrupando para factorizar por agrupación,

$$z_m \left[-2\xi z + (1-2\xi^2) e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) - 2\xi^2 \dot{z}^* - \xi z (1-2\xi^2) \right] = 0,$$

volviendo a factorizar,

$$z_m \left[-2\xi z + (1-2\xi^2) \left[-\xi z + e^{-\xi\tau} \cos\left(\sqrt{1-\xi^2}\tau\right) \right] - 2\xi^2 \dot{z}^* \right] = 0,$$

lo que está dentro del paréntesis cuadrado interno es \dot{z}^* (ecuación 25), por lo tanto,

$$z_m \left[-2\xi z + (1-2\xi^2) \dot{z}^* - 2\xi^2 \dot{z}^* \right] = 0,$$

distribuyendo y sumando términos semejantes,,

$$z_m \left[-2\xi z + \overset{*}{z} - 2\xi^2 \overset{*}{z} - 2\xi^2 \overset{*}{z} \right] = 0,$$

ya que z_m no es cero, entonces:

$$-2\xi z + (1 - 4\xi^2) \overset{*}{z} = 0,$$

reemplazando z y $\overset{*}{z}$, ecuaciones (15) y (25) respectivamente,

$$2\xi \left(\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) \right) = (1-4\xi^2) \cdot \left(-\xi \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\tau} \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) + e^{-\xi\tau} \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau) \right)$$

los exponentes se cancelan, distribuyendo, agrupando y factorizando se llega a:

$$\left(\frac{\xi(3-4\xi^2)}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) \sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau) = (1-4\xi^2) \cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau),$$

transponiendo algunos factores,

$$\frac{\sin(\sqrt{1-\xi^2}\tau)}{\cos(\sqrt{1-\xi^2}\tau)} = \frac{\sqrt{1-\xi^2}(1-4\xi^2)}{\xi(3-4\xi^2)},$$

luego,

$$\tan(\sqrt{1-\xi^2}\tau) = \frac{\sqrt{1-\xi^2}(1-4\xi^2)}{\xi(3-4\xi^2)}, \quad (27)$$

ecuación que permite despejar el tiempo (τ_m) en el cual la fuerza alcanza su valor máximo dentro del recorrido. Con la ecuación (27) se construye el triángulo que se muestra en la figura (3), llamando por comodidad θ al ángulo:

Note que en el triángulo la hipotenusa es 1 y esto permite las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \sqrt{1-\xi^2}\tau &= \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2}(1-4\xi^2)}{\xi(3-4\xi^2)} \right] \\ &= \sin^{-1} \left[\sqrt{1-\xi^2}(1-4\xi^2) \right] = \cos^{-1} [\xi(3-4\xi^2)]. \end{aligned} \quad (28)$$

Así, el tiempo en el que la fuerza alcanza su valor máximo dentro del recorrido, es:

$$\tau_m = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin^{-1} \left[\sqrt{1-\xi^2}(1-4\xi^2) \right]. \quad (29)$$

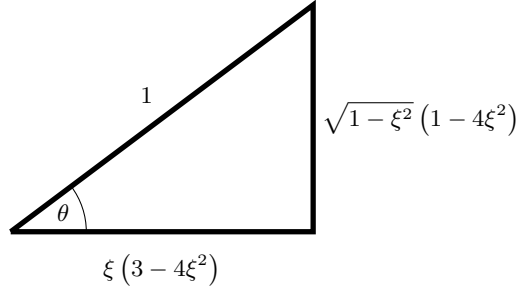


Figura 3. Triángulo que se construye a partir de la ecuación (27).

y este valor se reemplaza en la ecuación (23) para encontrar el valor máximo de la fuerza, así:

$$\bar{F}_m = z_m \left(2\xi z^*(\tau_m) + z(\tau_m) \right),$$

reemplazando z y z^* , ecuaciones (15) y (25) respectivamente,

$$\begin{aligned} \bar{F}_m = z_m \left[2\xi \left(-\xi z(\tau_m) + e^{-\xi\tau_m} \cos \left(\sqrt{1 - \xi^2} \tau_m \right) \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\tau_m} \sin \left(\sqrt{1 - \xi^2} \tau_m \right) \right] \end{aligned}$$

reemplazando apropiadamente las relaciones (28),

$$\begin{aligned} \bar{F}_m = z_m e^{-\xi\tau_m} \left[\frac{(1 - 2\xi^2)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin^{-1} \left[\sqrt{1 - \xi^2} (1 - 4\xi^2) \right] \right) \right. \\ \left. + 2\xi \cos \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos^{-1} \left[\xi (3 - 4\xi^2) \right] \right) \right] \end{aligned}$$

aplicando las propiedades de cancelación del seno, lleva a:

$$\bar{F}_m = z_m e^{-\xi\tau_m},$$

y por la ecuación (22), la anterior queda:

$$\bar{F}_m = e^{-\xi\tau_f} e^{-\xi\tau_m},$$

o

$$\bar{F}_m = e^{-\xi(\tau_f + \tau_m)}. \quad (30)$$

que corresponde al valor máximo que alcanza la fuerza dentro del recorrido en función de ξ . La tarea ahora consiste en encontrar para cuál valor de ξ esta fuerza máxima toma su valor mínimo.

Note que la ecuación (29), restringe aún más los valores de ξ , por lo tanto:

$$0 \leq \xi \leq \frac{1}{2}. \quad (31)$$

En los valores límites:

- $\xi = 0$: A partir de (21) y reemplazando ξ por cero, se obtiene:

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1-0^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-0^2}}{0} \right) = \frac{\pi}{2},$$

y con (29),

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1-0^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-0^2} (1-4 \cdot 0^2)}{0 \cdot (3-4 \cdot 0^2)} \right) = \frac{\pi}{2},$$

y de acuerdo a (30), la fuerza es:

$$\bar{F}_m = e^{-0(\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{2})} = 1.$$

- $\xi = \frac{1}{2}$: A partir de (21) y reemplazando ξ por un medio, se obtiene:

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{4}}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\frac{1}{4}}}{\frac{1}{2}} \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \tan^{-1} \sqrt{3} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}},$$

y con (29),

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{4}}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\frac{1}{4}} (1-4 \cdot \frac{1}{4})}{\frac{1}{2} \cdot (3-4 \cdot \frac{1}{4})} \right) = 0,$$

y de acuerdo a (30), la fuerza es:

$$\bar{F}_m = e^{-\frac{1}{2}(\frac{2\pi}{3\sqrt{3}}+0)} \approx 0.5463.$$

Al graficar la ecuación (30) en función de ξ , además de confirmar los valores extremos de arriba se puede verificar que F_m alcanza el valor mínimo cuando ξ está cerca de 0.4. Para encontrar el valor de ξ que hace mínimo la fuerza máxima, se procede a calcular:

$$\frac{d\bar{F}_m}{d\xi} = 0,$$

así,

$$\frac{de^{-\xi(\tau_f+\tau_m)}}{d\xi} = 0,$$

derivando:

$$e^{-\xi(\tau_f+\tau_m)} \frac{d[-\xi(\tau_f+\tau_m)]}{d\xi} = 0,$$

como el exponente no es cero, entonces lo anterior se reduce a:

$$-\frac{d[\xi(\tau_f+\tau_m)]}{d\xi} = 0,$$

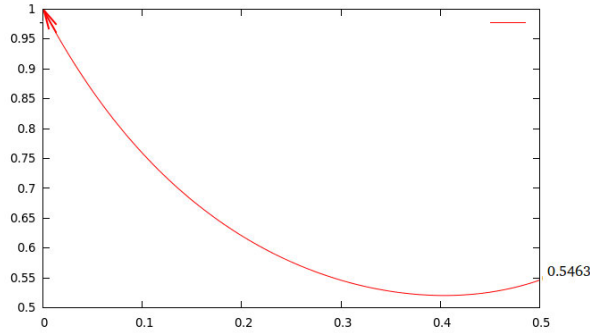


Figura 4. Gráfica de F_m vs ξ . El valor mínimo de F_m se encuentra cuando $\xi \approx 0.4$.

aplicando la regla del producto,

$$\tau_f + \tau_m + \xi \frac{d}{d\xi} (\tau_f + \tau_m) = 0,$$

propiedad lineal,

$$\tau_f + \tau_m + \xi \frac{d\tau_f}{d\xi} + \xi \frac{d\tau_m}{d\xi} = 0. \quad (32)$$

Se debe calcular cada derivada por aparte. Al reemplazar se llega a la ecuación:

$$\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2} (1-4\xi^2)}{\xi (3-4\xi^2)} \right] - 4\xi \sqrt{1-\xi^2} = 0, \quad (33)$$

donde el valor de ξ que hace mínima la fuerza normalizada se calcula por métodos numéricos con el algoritmo de Newton-Raphson. Para esto se toma:

$$f(\xi) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2} (1-4\xi^2)}{\xi (3-4\xi^2)} \right] - 4\xi \sqrt{1-\xi^2}. \quad (34)$$

se calcula la derivada para finalmente obtener la fórmula de iteración:

$$\xi_{n+1} = \xi_n - \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi_n^2}}{\xi_n} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{1-\xi_n^2} (1-4\xi_n^2)}{\xi_n (3-4\xi_n^2)} \right] - 4\xi_n \sqrt{1-\xi_n^2}}{\frac{-8+8\xi_n^2}{\sqrt{1-\xi_n^2}}}, \quad (35)$$

se toma como valor inicial $\xi = 0.5$ ya que se sabe que ξ debe estar cerca de 0.4. Se implementa el código C++:

Método de Newton-Raphson

```
#include<iostream>
#include<cmath>
using namespace std;

double f(double b){
double f;
f = atan(sqrt(1-b*b)/b)+atan(sqrt(1-b*b)*(1-4*b*b)/(b*(3-4*b*b)))-4*b*sqrt(1-b*b);
return f;
}

double fprima(double b){
double f;
f = -1/sqrt(1-b*b) - 3/sqrt(1-b*b) - (4-8*b*b)/sqrt(1-b*b);
return f;
}

main(){
double b = 0.4; double epsilon = 10.0; double b0 = 0.5;
for(int i = 0; i < 5; i++){
epsilon = abs(b - b0);
cout <<< b <<< " " <<< epsilon <<< endl;
b0 = b;
b = b - f(b)/fprima(b);
return 0;
}
```

al ejecutar el programa se genera la siguiente tabla:

| $b = \xi$ | epsilon |
|------------|-------------|
| 0.4 | 0.1 |
| 0.403969 | 0.00396898 |
| 0.403973 | 3.77263e-06 |
| 0.40397275 | 3.43542e-12 |
| 0.40397275 | 0 |

Cálculo de κ y c óptimos

Para calcular el valor de la fuerza máxima primero se deben calcular los valores de τ_f y τ_m , con las ecuaciones (20) y (29) respectivamente, así:

$$\tau_f = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.40397275^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - 0.40397275^2}}{0.40397275} \right) \approx 1.26254626,$$

y

$$\tau_m = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.40397275^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - 0.40397275^2} (1 - 4 \cdot 0.40397275^2)}{0.40397275 (3 - 4 \cdot 0.40397275^2)} \right) \approx 0.35334476,$$

y la fuerza máxima con la ecuación (30), así:

$$\bar{F}_m = e^{-0.40397275(1.26254626+0.35334476)} \approx 0.52059862,$$

y por lo tanto el valor de z_m (ecuación (22)), es:

$$z_m = e^{-0.40397275 \cdot 1.26254626} \approx 0.6004748.$$

En la siguiente tabla se resume el valor de los anteriores parámetros:

| parámetro | valor |
|-------------|------------|
| ξ | 0.40397275 |
| τ_f | 1.26254626 |
| τ_m | 0.35334476 |
| \bar{F}_m | 0.52059862 |
| z_m | 0.6004748. |

Suponiendo que un obstáculo de 1000 kg se acerque a una rapidez de 8 m/s y que se estime un desplazamiento máximo del parachoques de 0.04 m, es decir:

$$\begin{aligned} v_0 &= 8 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\ x_m &= 0.04 \text{ m}, \\ m &= 1000 \text{ kg}, \end{aligned}$$

se calcula ω , como:

$$\omega = z_m \cdot \frac{v_0}{x_m} = 0.6004748 \cdot \frac{8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.04 \text{ m}} \approx 120.09496 \frac{\text{rad}}{\text{s}},$$

y despejando κ de la ecuación $\omega = \sqrt{\kappa/m}$, se obtiene el valor:

$$\kappa = \omega^2 \cdot m = \left(120.09496 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 1000 \text{ kg} \approx 14422800 \frac{\text{N}}{\text{m}},$$

finalmente de la definición de ξ se despeja el valor de c , así:

$$c = 2\xi\sqrt{\kappa \cdot m} = 2 \cdot 0.40397275 \cdot \sqrt{14422800 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ kg}} \approx 97030.243 \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

Para resumir los últimos resultados se presenta la siguiente tabla:

| parámetro | valor |
|-----------|-------------------------------------------|
| ω | 120.09496 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, |
| κ | 14422800 $\frac{\text{N}}{\text{m}}$, |
| c | 97030.243 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$. |

Para la solución de 33 y la obtención de los valores óptimos, también se desarrolló en el instrumento virtual en Labview 8.5, del cual se muestra el panel frontal en la figura 5 y se aprecian los valores de las constantes κ y c para condiciones iniciales de desplazamiento, masa y velocidad.

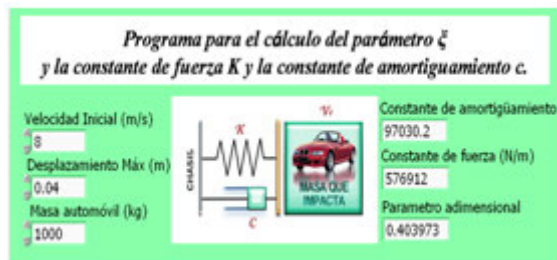


Figura 5. Panel frontal de VI desarrollado para el cálculo de ξ , κ y c .

5. Conclusión

- El teorema Pi de Buckingham es una herramienta adecuada para formalizar la obtención de parámetros adimensionales que permiten la adimensionalización de ecuaciones diferenciales.
- Un problema complejo de ecuaciones con varios parámetros se simplifican de algún modo adimensionalizando la ecuación dinámica del sistema.
- En el proceso de adimensionalizar ecuaciones diferenciales se obtienen triángulos rectángulos de hipotenusa 1, figuras 2 y 3, que inciden directamente en la solución del problema.

Referencias

1. Peters D. A.: Optimum Spring-Damper Design for Mass Impact, SIAM Review, Vol. 39, No. 1 , pp. 118-122. (1997)
2. Cengel Y., Cimbala J.: Fluid Mechanics with Student Resources. McGraw-Hill Science/engineering/Math; 2nd edition, (2009)
3. Kundu P. S., Cohen I. M.: Fluid Mechanics. Academic Press. (2002)
4. Bernal M., Martínez R., Cataño E.: Análisis Dimensional y Dispersión de Rutherford, RCF-2010. (2010)
5. Bernal M. A., Camacho F, J., Martinez R.: Dimensional analysis and Rutherford scattering, EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS, Eur. J. Phys. 34 L5?L8. (2013)



Caracterización química del aceite esencial e identificación preliminar de metabolitos secundarios en hojas de la especie *raputia heptaphylla* (rutaceae)

Carlos Andrés Coy Barrera^{1*}, Jorge Parra^{1**}, Luis Enrique Cuca Suárez^{2***}

¹ Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Departamento de Química. Bogotá, Colombia.

² Laboratorio de Investigación en Productos Naturales Vegetales, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Bogotá, Colombia.

FECHA DE ENTREGA: 9 DE MARZO DE 2014
FECHA DE EVALUACIÓN: 14 DE MAYO DE 2014
FECHA DE APROBACIÓN: 2 DE JUNIO DE 2014

Resumen Con el objetivo de determinar la composición química del aceite esencial de hojas de la especie *R. heptaphylla* que pertenece a la familia Rutaceae y de la presencia preliminar de algunos metabolitos secundarios presentes en esta especie, se realizó la Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) al aceite esencial obtenido por arrastre con vapor y se realizaron pruebas químicas cualitativas de coloración y precipitación al extracto etanólico de hojas; encontrando para el caso del aceite la presencia principalmente de compuestos tipo monoterpeno y en el análisis fitoquímico preliminar la posible presencia de; flavonoides, alcaloides, terpenoides, compuestos aromáticos y taninos.

Abstract In order to determine the chemical composition of the essential oil of leaves belonging to the *R. heptaphylla* species (Rutaceae family) and to search for the preliminary presence of some secondary metabolites existing in this species, we carried out gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS) to the essential oil resulting from steam distillation. Also, we performed qualitative coloring and precipitation chemical tests to the ethanol leaves extract. Regarding the oil, we found the presence of monoterpenoid compounds and when performing the preliminary phytochemical analysis, the possible presence of flavonoids, alkaloids, terpenoids, aromatic compounds, and tannin.

Palabras Clave: *Raputia*, Rutaceae, sesquiterpenos, alcaloide, limonoides, flavonoides

Keywords: *Raputia*, Rutaceae, sesquiterpenoids, alkaloid, limonoids, flavonoids.

* carlos.coy@unimilitar.edu.co

** jorgee.parraa@unimilitar.edu.co

*** lecucas@unal.edu.co

1. Introducción

De acuerdo con la tendencia de la población de hacer uso de medicamentos de origen natural, para los investigadores en productos naturales, se hace indispensable la profundización en el conocimiento de las plantas medicinales, analizar su composición química y los factores que puedan hacerla variar, conocer la estructura y las propiedades de los principios activos con miras para poder determinar su posible actividad farmacológica, determinar las indicaciones, contraindicaciones, efectos secundarios entre otros, con el fin de utilizarlas en el tratamiento y prevención de los problemas de salud.

La farmacognosia es la ciencia farmacéutica que se ocupa del estudio de las drogas y las sustancias medicamentosas de origen natural; la fitoquímica por su parte estudia las moléculas implicadas en la actividad de las plantas, el conocimiento de su estructura y de su comportamiento, este conocimiento es fundamental en un estudio farmacognóstico.[1,2]

Actualmente se tienen desarrollados una serie de métodos para la detección preliminar de los diferentes constituyentes químicos de una planta, consistente en una reacción química que produce alteración rápida en la estructura molecular del compuesto como la modificación de un grupo funcional, la apertura de un sistema anular o la formación de un complejo, lo cual da por resultado una manifestación sensible como el cambio de color, la formación de un precipitado o el desprendimiento de un gas, lo que se conoce como una prueba fitoquímica preliminar.[3,4]

La familia Rutaceae, se caracteriza por poseer un sinnúmero de especies con un alto porcentaje de usos etnobotánicos, los cuales se encuentran ampliamente reportados en diversas bases de datos y revistas dedicadas al estudio de los productos naturales, este género en mención producen metabolitos secundarios con una variedad estructural interesante, destacando la producción de alcaloides, flavonoides limonoides y terpenos. [5,6,7,8,9,10,11,12] Esta información resulta interesante ya que sirve como prueba para continuar con estudios de carácter fitoquímico con el fin de encontrar potenciales sustancias con propiedades farmacológicas importantes en el campo de la medicina natural.

Además las investigaciones actuales han enfocado sus estudios en la búsqueda de compuestos que posean usos como agentes terapéuticos con el fin de controlar las diferentes enfermedades que derivan de los microorganismos, [13,14] además el uso de los aceites esenciales ha tomado un papel importante en esta búsqueda, debido a que muchas veces la mezcla de componentes terpénicos, (oxigenados varios de ellos), obtenidos por su correspondiente caracterización química por la técnica de CG-EM presentan algún tipo de actividad frente a bacterias comunes, [15,16] lo cual puede derivar en usos importantes y amplias perspectivas para el uso de los productos naturales tanto volátiles como fijos, aumentando las posibilidades y agentes terapéuticos derivados de plantas.

2. Parte experimental

2.1. Material vegetal

La muestra de *Raputia heptaphylla* hojas, corteza y madera fue recolectada en Albán, municipio de Cundinamarca, en el bosque llamado “formador de agua”, la muestra fue identificada y clasificada, un ejemplar de esta especie reposa en el Herbario Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia bajo el COL. 511102.

2.2. Obtención del aceite esencial de hojas de la especie *R. heptaphylla*

La muestra de hojas frescas fué trasladada al laboratorio de Investigación en la Universidad Militar Nueva Granada bajo refrigeración a una temperatura de 4 °C, posteriormente se hizo la extracción del aceite esencial a 1 kg de material proveniente de cada especie, procedimiento que se realizó en un equipo de destilación por arrastre con vapor durante dos horas, el aceite esencial obtenido se separó de la capa acuosa, se secó con sulfato de sodio anhidro y se filtró. Una alícuota se envió para determinar su composición química. Se determinaron los índices de Kovats analizando conjuntamente la muestra con una mezcla de *n*-alcanos (C₈ a C₂₂). Los espectros de masas se realizaron en un equipo Hewlett Packard 5973 GC/MS a 70 eV, equipado con un inyector automático, utilizando una columna capilar HP-5MS (30 m, 0,25 mm, 0,25 mm). El programa de temperatura utilizado fue el mismo que se indicó para el análisis cromatográfico. Se inyectó una muestra de 1,0 mL de una solución al 2 % del aceite esencial en *n*-hexano con reparto de 100:1. Se utilizó una temperatura de inyección de 200 °C. La identificación de los componentes de los aceites se realizó mediante comparación computarizada de los espectros obtenidos con los espectros de una Librería Wiley (6ta Edición).

3. Análisis fitoquímico preliminar

3.1. Reconocimiento de alcaloides

Los alcaloides son sustancias básicas que contienen nitrógeno en un anillo heterocíclico, son derivados de aminoácidos y se encuentran en las plantas superiores de un ácido orgánico. En el análisis fitoquímico preliminar las técnicas de reconocimiento son basadas en la capacidad que tienen los alcaloides en estado de sal (extractos ácidos), de combinarse con el yodo y metales pesados formando precipitados con reactivos como el mercuriyoduro de potasio (de mayer) y yoduro de bismuto (Dragendorff), estas reacciones se basan en los siguientes comportamientos:

El yoduro de potásico cuando reacciona con cloruro mercúrico, forma un precipitado rojo de yoduro mercúrico: $[\text{HgCl}_2 + 2\text{I}^- \rightarrow 2\text{Cl}^- + \text{HgI}_2]$ soluble en exceso de iones de yoduro con formación de un anión complejo incoloro:

$[\text{HgI}_2 + \text{I}^- \longrightarrow \text{HgI}_4^{2-}]$. La solución alcalina de este complejo sirve para descubrir indicios de amoníaco. En esta reacción se forma el compuesto de color pardo oxyoduro mercuri amoníaco, que es soluble en exceso de complejo $[\text{HgI}_4^{2-}]$, generando intenso color amarillo.

Los alcaloides por su carácter nitrogenado pueden comportarse de forma similar al amoníaco, ante estos reactivos (Reactivo de mayer); muchos alcaloides presentes en un material vegetal forman con el bismuto, yoduros dobles insolubles de fórmula general $\text{Bi}_3\text{B} \cdot \text{HI}$ (Reactivo de Draggendorf).

3.2. Reconocimiento de Flavonoides y Taninos

Químicamente los taninos son polímeros de polifenoles con 1 a 2 % de hidróxidos fenólicos libres, los Flavonoides son compuesto polifenólicos que se encuentran ampliamente distribuidos en plantas verdes. Estos compuestos al igual que los compuestos fenólicos precipitan en presencia de cloruro férrico.

Esta respuesta se debe al ataque producido por el Ion cloruro al hidrógeno del grupo hidroxilo provocando una ruptura de enlace y la unión del grupo fenóxido al hierro (formación de complejo).

3.3. Terpenos y esteroides

Elaborados a partir de los mismos precursores, terpenoides y esteroides constituyen sin duda, el más amplio conjunto conocido de metabolitos secundarios de los vegetales. Estos compuestos tienen en común que se pueden considerar formados por la unión de un número entero de unidades pentacarbonadas ramificadas derivadas del isopreno, están clasificados como lípidos insaponificables. La presencia de estos compuestos se pueden determinar por cromatografía de capa delgada; como estos metabolitos no producen por si solos manchas coloreadas en el cromatograma, su ubicación se detecta asperjando un agente revelador como el reactivo de vainillina ácido ortofosfórico (1 % vainillina y 10 % de ácido en etanol), originando un nuevo compuesto químico coloreado sensible a nuestro sistema ocular.

3.4. Reactivos utilizados para el análisis fitoquímico preliminar

La muestra fresca de la hojas *R. heptaphylla* fue macerada con etanol al 96 %, se separó el sobrenadante y se repartió en un frasco colector y en tres tubos de ensayo. A cada uno de los tubos se agregaron gotas de reactivo Mayer, Draggendorff, vainillina, FeCl_3 y Pancaldi respectivamente.

Alcaloides

Mayer. El reactivo Mayer se emplea para la caracterización no específica de alcaloides L a mayoría de los alcaloides reaccionan dando un precipitado blanco o amarillo claro, amorfo o cristalino. El precipitado es (una sal compleja) puede disolverse posteriormente en un solvente menos polar para su identificación. El reactivo Mayer se basa en la acidez de los alcaloides en su forma de sales (Clorhidratos) debido a que en medios básicos el reactivo Mayer no precipita. A 1 mL de extracto ácido agregar unas gotas de reactivo de Mayer. Observar formación de precipitado blanco.

Dragendorff. El reactivo de Dragendorff se prepara mezclando 8 g de nitrato de bismuto pentahidratado en 20 ml de ácido nítrico al 30 % con una solución de 27.2 g de yoduro de potasio en 50 ml de agua. Se deja en reposo por 24 horas, se decanta y se afora a 100 ml. La presencia de alcaloides se detecta por la formación de un precipitado naranja rojizo cuando se le adiciona esta reactivo a una solución ácida de alcaloides.

Taninos

Cloruro férrico ($FeCl_3$). Cloruro de hierro (III) como catalizador de reacciones de alquilación de benceno. La “prueba del cloruro férrico” es una prueba colorimétrica tradicional para fenoles, que usa una disolución al 1 % de cloruro de hierro (III) que ha sido neutralizada con hidróxido sódico hasta que se forme un leve precipitado de $FeO(OH)$. La sustancia orgánica se disuelve en agua, metanol o etanol, luego se añade la disolución neutra de cloruro: se forma un complejo coloreado transitorio o permanente (normalmente púrpura, verde o azul) indica la presencia de un fenol o enol. Permite reconocer la presencia de compuestos fenólicos y/o taninos, determina tanto fenoles como taninos. A 0.2 mL de extracto etanólico agregar 1 gota de solución de cloruro férrico al 0.1 %.

- Desarrollo de una coloración rojo-vino, compuestos fenólicos en general.
- Desarrollo de una coloración verde intensa, taninos del tipo pirocatecólicos.
- Desarrollo de una coloración azul, taninos del tipo pirogalol, derivados del ácido gálico.

Terpenos y Esteroides

Vainillina. Solución al 1 % p/v de vainillina en metanol. El método de la vainillina se usa ampliamente para la cuantificación de proantocianidinas (taninos condensados) en frutas y granos. El ensayo de la vainillina es específico para flavan-3-ol, dihidrochalconas y proantocianinas, las cuales tienen un enlace simple en la posición 2,3 y poseen grupos hidroxilos en la posición meta del anillo B. La catequina es un flavan-3-ol monomérico frecuentemente usado como un estándar en el ensayo de la vainillina. El metanol, disolvente usado para el ensayo de la vainillina, puede afectar la cinética de reacción de la catequina y taninos con vainillina diferencialmente. El ensayo de la vainillina en metanol es más sensible

para los taninos poliméricos que para los flavan-3-oles monoméricos. Este ensayo es generalmente reconocido como un método útil para la detección y cuantificación de taninos condensados en plantas debido a su sensibilidad, especificidad y simplicidad. Sin embargo, debe ser considerada la posibilidad de interferencias con dihidrochalconas y antocianinas. El método se puede usar para cuantificar taninos condensados en un intervalo de 5-500 g con precisión y exactitud mayores a 1 g cuando la concentración óptima de reactantes y disolventes son elegidos.

Este método se basa en la condensación de la vainillina con proantocianinas en una solución acidificada. La vainillina protonada, un electrófilo débil, reacciona con el anillo del flavonoide en la posición 6 u 8. El producto de esta reacción se deshidrata fácilmente para dar un color rosa ligero a un intenso rojo cereza. La estabilidad del color del aducto vainillina- tanino puede incrementarse cuando la luz es excluida y la temperatura de reacción es controlada y entonces se obtienen resultados exactos y reproducibles.

Compuestos Aromáticos

Pancaldi. $(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_4$, $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$, H_2SO_4 , H_2O , dando coloración azulada sobre la placa de sílice, es prueba positiva para compuestos aromáticos, puede ser que se de una reacción de oxidación sobre compuestos aromáticos de acuerdo con la estructura química del reactivo de Pancaldi. Con la muestra del frasco colector se realizó cromatografía en capa delgada; usando dos placas de sílica gel como fase estacionaria que se sembraron con tres muestras del extracto (1,2 y 3 gotas) usando como eluyente 15 gotas de etanol.

4. Resultados y discusión de resultados

En el cuadro 1 se muestran los resultados de la composición química del aceite esencial de hojas de la especie *R. heptaphylla*.

El análisis fitoquímico preliminar cualitativo mostró los siguientes resultados de acuerdo a cada uno de los reactivos utilizados en este ensayo, además se realizaron por duplicado buscando tener datos más confiables en cuanto a la información del tipo de componentes que posee la muestra vegetal.

Para el extracto etanólico de hojas de la especie *R. heptaphylla*, se puede evidenciar la presencia de alcaloides, flavonoides, terpenos y esteroides y compuesto aromáticos, lo que está de acuerdo con la literatura encontrada, sin embargo en Colombia es la primera vez que se realiza este ensayo preliminar para una especie con una variedad de metabolitos interesante sobretodo alcaloides y compuestos terpénicos del tipo limonoide. [12]

5. Conclusiones

En el perfil cromatográfico del aceite esencial se pueden observar 74 picos de los cuales, el 56 % son de tipo monoterpeno y el 43,2 % tipo sesquiterpeno. De estos

| Índice de retención (Kovats) | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|------|------------|------------------|--------------|
| Compuesto | Tiempo Calculado de retención | | Literatura | % áreas Muestras | Bibliografía |
| Monoterpenos | | | | | |
| α -pineno | 12095 | 930 | 934 | 13,1 | [18] |
| canfeno | 12585 | 949 | 953 | 10,96 | [18] |
| β -Pineno | 13715 | 977 | 980 | 9,49 | [18] |
| β -Mirceno | 14444 | 988 | 991 | 3,5 | [18] |
| α -Felandreno | 14846 | 998 | 1005 | 1,99 | [18] |
| eucaliptol | 15855 | 1028 | 1033 | 15,19 | [18] |
| limoneno | 15942 | 1030 | 1031 | 3,29 | [18] |
| γ -terpineno | 17049 | 1050 | 1059 | 2,01 | [18] |
| α -terpinoleno | 18198 | 1080 | 1089 | 1,01 | [18] |
| alcanfor | 19818 | 1140 | 1143 | 16,76 | [18] |
| borneol | 20832 | 1169 | 1165 | 2,39 | [18] |
| acetato de bornilo | 25227 | 1280 | 1285 | 3,72 | [18] |
| Sesquiterpenos | | | | | |
| β -cariofileno | 29983 | 1412 | 1418 | 2,16 | [18] |
| α -cariofileno | 30991 | 1441 | 1444 | 1,1 | [18] |
| selina-3,7(11)-dieno | 32699 | 1530 | 1542 | 2,04 | [18] |

Cuadro 1. Composición química del aceite esencial de hojas de *R. heptaphylla*.

| Metabolito secundario | Prueba química | Resultado (*) | Observaciones |
|-----------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| Alcaloides | Mayer | +++ | Precipitado blanco |
| Alcaloides | Dragendorff | +++ | Precipitado naranja |
| Flavonoides y taninos | FeCl ₃ | +++ | Coloración verde |
| Terpenos y esteroides | Vainillina | +++ | Coloración rosada, morada |
| Compuestos aromáticos | Pancaldi | +++ | Coloración azul |

Cuadro 2. Resultados del análisis fitoquímico preliminar. (*) Los resultados se reportan: Poco (+), regular (++) , Abundante (+++), Negativo (-).

74 componentes fueron determinados 15, que representan el 88,06% del total de porcentaje de área del aceite esencial para monoterpenos y el 7,57% para 14 picos correspondientes a compuestos tipo sesquiterpeno.

El aceite esencial esta constituido principalmente por monoterpenos, (los mayoritarios se muestran en el cuadro 1) de los cuales los componentes mayo-

ritarios encontrados fueron canfeno (10,96%), eucaliptol (15,19%) y alcanfor (16,76%) siendo el alcanfor el compuesto con el mayor porcentaje. En cuanto a los sesquiterpenos, el constituyente que se encuentra en mayor porcentaje es el β -Cariofileno (2,16%).

El aceite esencial obtenido de las hojas frescas de *Raputia heptaphylla* esta constituido principalmente por compuestos monoterpénicos encontrándose en mayor proporción los siguientes componentes: Alcanfor, Eucaliptol y Canfeno, y sesquiterpenos en menor porcentaje, resaltando también que este es el primer reporte en cuanto a la caracterización del aceite esencial de la especie objeto de estudio.

En cuanto al análisis fitoquímico preliminar, se logró determinar la posible presencia de metabolitos con núcleos del tipo alcaloide, flavonoide, triterpeno, taninos y compuestos aromáticos.

Referencias

1. Bruneton J.: Farmacognosia Fitoquímica – plantas medicinales. 2a edición. Editorial ACRIBIA. Zaragoza España. (2001).
2. Ministerio de protección social.: Vademécum de plantas medicinales aprobadas en Colombia.
3. Lock de Ugaz, O.: Capítulo IV. Análisis fitoquímico y metabolitos secundarios. Pontificia Universidad Católica del Perú.
4. Bilbao, M.: Análisis fitoquímico preliminar. Universidad del Quindío. Facultad de ciencias básicas y tecnologías. Armenia, (1997).
5. Puentes, L.: Estudio Químico de algunos de los metabolitos presentes en el extracto etanólico de *Raputia heptaphylla* (RUTACEAE) [Tesis de grado]. Bogotá: Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia; (2005).
6. de Souza, J., Arruda, A., Muñoz, G., Arruda, M., Muller, A.: Prenylated flavones from *Neoraputia paraensis*. *Phytochemistry*, 52(8):1705-9. (1999).
7. Passador, E., Fatima, Das G. M., Da Silva, F., Rodrigues, E., Fernandes, J., Vieira, P., Pirani, J. A.: Pyranochalcone and a flavanone from *Neoraputia Magnifica*. *Phytochemistry*, 45(7):1533-7. (1996).
8. Tomazela, D., Pupo, M., Passador, M., da Silva, M., Vieira, P., Fernandes, J., et al.: Pyrano chalcones and a flavone from *Neoraputia magnifica* and their *Trypanosoma cruzi* glycosomal glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase-inhibitory activities. *Phytochemistry*, 55(6):643-51. (2000).
9. Bakhtiar, A., Gleye, J., Moulis, C., Foraste, I.: C-Glycosyl flavones from *Raputia paraensis*. *Phytochemistry*, 30(11):3840-1. (1991).
10. Vieira, LV., Moura, T., das GFMF, Fernandes, JB., Vieira, PC., Oliva, G, et al.: Novo alcalóide bisindol de *Raputia prateermisssa* Emmerich (Rutaceae) e sua importancia quimiosistemática; XXIV Reunião anual sobre Evolucao, Sistemática e ecología micromoleculares. Instituto de Química, Universidade Federale de Fluminense, 21. (2004).
11. Vougiopoulou, K., Fokialakis, N., Aligiannis, N., Cantrell, C., Skaltsounis, A.: The raputindoles: Novel cyclopentyl bisindole alkaloids from *Raputia simulans*. *Organic Letters*, 12(9):1908-1911. (2010).
12. Coy Barrera, C. A., Coy Barrera, E. D., Granados Falla, D. S., Delgado Murcia G., Cuca Suarez, L. E.: Seco-limonoids and quinoline alkaloids from *Raputia heptaphylla*

- and their antileishmanial activity. Chemical Pharmaceutical and Bulletin 59(7):855-9. (2011).
13. Gibbons, S.: Anti-staphylococcal plant natural products; Natural Products Research, 21: 263-277. (2004).
 14. Gibbons, S.: Plants as a source of bacterial resistance modulators and anti-infective agents; Phytochemistry Reviews, 4:63-78. (2005).
 15. Eteghad, S.S., Mirzaei, H., Pour, S.F., Kahnaui, S.: Inhibitory Effects of endemic, *Thymus vulgaris* and *Menta piperita* Essential Oils on Escherichia coli O157:H7, Research Journal of Biology Science, 4(3); 340-344. (2009).
 16. Jarrar, N., Abu-Hijleh, Adwan K.: Antibacterial activity of *Rosmarinus officinalis* L. alone and in combination with cefuroxime against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 121-123. (2010).
 17. Goodner, K. L: Practical retention index models of OV-101, DB-1, DB-5, and DB-Wax for flavor and fragrance compounds. LWT-Food Science and Technology, 41, 951-958. (2008).
 18. Adams, R. P.: Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectroscopy. Allured Publishing Corporation, USA, pp. 3-436. (1995).



Estudio de costos de mantenimiento en helicópteros militares mediante la aplicación del costeo abc

Mario Javier Giraldo*, Diana Paola Tapiero Paredes, Mónica García Castillo

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Bogotá, Colombia

FECHA DE ENTREGA: 19 DE MARZO DE 2013
FECHA DE EVALUACIÓN: 11 DE NOVIEMBRE 2013
FECHA DE APROBACIÓN: 6 DE MAYO DE 2014

Resumen Bajo información de la Fuerza Aérea Colombiana e investigaciones del mantenimiento en helicópteros, se evidencian mecanismos de control y clasificación de actividades. Esto se desarrolla al incorporar una metodología que permite evaluar, medir y simplificar la manera de manejar los costos de las operaciones realizadas en el mantenimiento de aeronaves. Se enfoca en helicópteros MIL MI 17, para tener claridad sobre los procesos y las actividades llevadas a cabo.

Abstract According to information provided by the Colombian Air Force and to investigations on helicopter maintenance, it is possible to highlight control and activity classification mechanisms. This is developed when incorporating a methodology that enables evaluating, measuring, and simplifying the way people manage the costs of the operations carried out when providing aircraft maintenance. In order to understand the processes and the activities developed, it is important to clarify that this paper focuses on helicopters MIL MI 17.

Palabras Clave: helicóptero, mantenimiento, costeo ABC, militar, fallas.

Keywords: helicopter, maintenance, ABC costing, military, flaw.

* magirald@poligran.edu.co

1. Introducción

Los helicópteros tienen en la actualidad dos aplicaciones. Una civil y otra militar. Dentro de la militar, es de gran importancia el contar con un mantenimiento eficaz y continuo. Al mismo tiempo se debe llevar un costeo de lo invertido en este aspecto. El desarrollo muestra el trabajo que han realizado las fuerzas armadas colombianas, mediante entrevistas e información pública. Por esta misma razón, no se pueden mostrar algunos procesos internos del proceso de implementación y resultados cuantificados.

2. Descripción del helicóptero

Aeronave sustentada y propulsada por uno o más rotores horizontales, cada uno formado por dos o más aspas. Los helicópteros están clasificados como aeronaves de alas giratorias para diferenciarlos de las aeronaves de ala fija. Éstos crean sustentación con las aspas que rotan alrededor de un eje vertical. [3]

Los helicópteros están compuestos principalmente por rotor principal, palas, rotor de cola, transmisión, ejes, engranajes, estructura general y servos. El mantenimiento de un helicóptero es más complejo que otras aeronaves debido a su autonomía de vuelo.

Una de las ventajas del helicóptero viene dada por el rotor. éste proporciona sustentación sin que la aeronave se esté desplazando. Lo que permite realizar despegues y aterrizajes verticales sin necesidad de pista. Existen dos tipos de helicópteros: civil y militar. Este último tiene armamento, mayor autonomía y tamaño, un distinto tipo de plataforma y mayor costo.



Figura 1.

2.1. Inicios de los helicópteros en Colombia

El helicóptero llega a Colombia, en 1953 con la entrada en servicio del equipo Hiller OH-23B Raven. El helicóptero apoya las fuerzas militares mediante la incorporación de equipos. En 1988 se compraron 10 Sikorsky UH-60A Black Hawk y en 1990, 20 UH-1H. [2]

Algunos de estos tienen equipos con sensores de anomalías magnéticas. Entre otros elementos que ayudan al combate. Los Helicópteros Militares se clasifican por tamaño: Livianos, Medianos y Pesados. El tipo específico es usado dependiendo las características de la misión en cuanto a la capacidad necesaria y tiempo de vuelo.

3. Partes de los helicópteros

Las principales partes de los helicópteros son:

3.1. Rotor principal

Conjunto de piezas que por sus exigencias en vuelo requiere de un mantenimiento casi constante. Todos los tornillos deben estar bien ajustados y pegados en los casos que sean necesarios.

3.2. Palas

Están relacionadas con el rotor principal, y la tensión de las mismas en los porta-palas. Su objetivo es evitar vibración, mediante un ajuste especial. Si están flojas, pueden golpear en la aceleración. Si están apretadas no pueden acomodarse en vuelo. Para que un juego de palas esté equilibrado debe tener el mismo peso y centro de gravedad.

3.3. Rotor de cola

El rotor de cola es más simple que el principal, por lo que el mantenimiento es mucho más simple, pero de igual importancia.

3.4. Transmisión

La transmisión va desde el motor hasta los dos rotores. Los helicópteros tienen las siguientes partes: embrague, ejes, engranajes, correas o tubos, rodamientos, acoples, piñones, entre otras piezas secundarias.

3.5. Ejes

Los tipos de ejes son: principal, cola, *spinddle* y *flybar*. No requieren mantenimiento, pero no se pueden doblar.

3.6. Engranajes

Los tipos de engranajes son: principal, corona cola y piñones de cola. Estos requieren de una inspección periódica, para evitar el gasto o saltos.

3.7. Estructura general

Compuesta por el chasis. Existen varios tipos y se les realiza una revisión periódica en cuanto a las piezas y tornillos que lo componen.

3.8. Servos

Los servos comprenden: paso, alerón y elevador, cola y acelerador. Requieren estar en óptimas condiciones siempre, por lo que se les realiza revisiones periódicas. Las partes generales del helicóptero llevan a su clasificación.

4. Clasificación de los helicópteros militares

En la industria militar esta depende del tamaño.

4.1. Liviano

Los helicópteros livianos fueron desarrollados por el China Helicopter Design Institute y Chang Aircraft Industry Group (CAIG). Se diferencian por poseer un radar en su proa.

Desarrollan tres tipos de misiones en el campo militar: enlace, exploración y apoyo táctico. Tiene capacidad máxima de transporte para cuatro soldados totalmente equipados. Las referencias en Colombia son las siguientes: [6]

- BELL 206 III
- A555
- B0 105
- H500

Para mayor capacidad de soldados se encuentran los helicópteros medianos.

4.2. Mediano

Además de poder llevar más soldados totalmente equipados, pueden llevarlos a mayor velocidad y distancia. Su capacidad máxima es de 19 soldados equipados para el combate en un radio de 460 km.

Desarrollan dos tipos de misiones: rebusca y rescate de tripulantes derribados en un radio de 520 km. El alcance máximo de este tipo de helicópteros en una misión de traslado es de 1.050 km. [6]

- HUEY II
- BELL 212



Figura 2.



Figura 3.

4.3. Pesado

Este tipo de helicóptero es capaz de transportar 24 soldados totalmente equipados. Tiene cohetes y misiles guiados antitanque. Algunas de las misiones que desarrollan son: ambulancia aérea, reconocimiento, observación, búsqueda y salvamento, mando aéreo para tanques y misión de comunicaciones. Las referencias en Colombia son las siguientes: [6]

- HUEY II
- MIL MI 17 IV
- MIL MI 17 V
- MIL MI 17 MD

Cada tipo de helicóptero tiene unas políticas especiales de mantenimiento. Pero el enfoque del documento es en los helicópteros de tipo pesado, referencia MIL MI 17.



Figura 4.

5. Políticas de mantenimiento helicóptero: MIL MI 17

Los Helicópteros MI-17 son aeronaves multipropósito. Estos son diseñados y fabricados en Rusia. Usados para todo tipo de misiones de vuelo. Permiten el desarrollo de las misiones, aun en condiciones de riesgo Nuclear, Biológico y Químico (NBQ). Se emplean en lo militar, civil y humanitario. Los Helicópteros MI-17 proporcionan la capacidad de extender y soportar operaciones de artillería. Usa armamento pesado terrestre, naval y aéreo.

5.1. Niveles de mantenimiento

Los Helicópteros militares en Colombia tienen cuatro niveles de mantenimiento. Los primeros tres se realizan en el territorio nacional y el último se hace el país de origen del helicóptero. En cada uno de estos niveles se desarrollan diversas actividades, tal como se enuncian a continuación: [6]

Primer nivel: inspección general

- Verificación de averías externas.
- Palas y hélices.
- Aplicación de aditamentos.

Segundo nivel: conexión de partes

- Verificación de potencia del motor.

Tercer nivel: armar – desarmar

- Reemplazar piezas dañadas.

Cuarto nivel: fallas en estructura

- Rotor de cola.
- Fragmentación del helicóptero en dos o más partes con posibles pérdidas de vidas humanas.

5.2. Secuencias de inspección

La secuencia de inspecciones que se hacen al helicóptero son Pre-Vuelo y Post-Vuelo. (ver figura 5): [1]

- A. Acercamiento al helicóptero.
- B. Parte delantera.
- C. Lado derecho del helicóptero.
- D. Batalón de cola lado derecho.
- E. Pylón y conjunto de rotor de cola.
- F. Batalón de cola lado izquierdo.
- G. Lado izquierdo del helicóptero.
- H. Parte inferior del helicóptero.
- I. Cabina de Carga/Pasajeros.
- J. Parte superior lado derecho.
- K. Parte superior lado izquierdo.

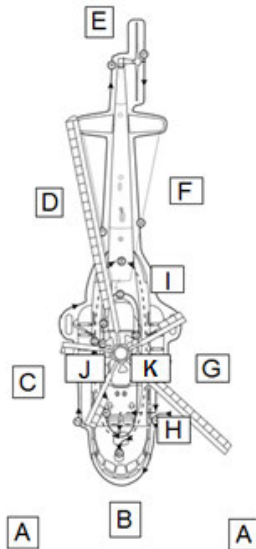


Figura 5.

6. Costos de mantenimiento helicóptero MIL MI 17

Los costos del mantenimiento del helicóptero MIL MI 17 están descritos en la figura 6. [6]

| TIPO | HELICÓPTERO | PROCEDENCIA | MANT. MENSUAL | 1 HORA DE VUELO |
|---------|----------------|-------------|---------------|-----------------|
| PESADOS | MIL MI 17 - IV | RUSO | \$ 11.400.000 | \$ 4.500.000 |
| | MIL MI 17 - V | RUSO | | |
| | MIL MI 17 - MD | RUSO | | |

Figura 6.

Estos helicópteros utilizan combustible JP 8 (*Jet Propulsion 8*), que es derivado del queroseno. La política de mantenimiento es la siguiente:

- Cada 2000 horas de vuelo, se efectúa una inspección hasta el Nivel de Mantenimiento 2.
- Cada 4000 horas de vuelo, Se efectúa una inspección hasta el Nivel de Mantenimiento 3.

Para el análisis de los costos de mantenimiento de los Helicópteros militares se realiza un análisis a partir de la metodología ABC. Con la metodología de Costos Basados en Actividades, (*Activity Based Costing*) se busca analizar los niveles de mantenimiento, según la clasificación de los mismos para el Helicóptero Mil Mi 17.



Figura 7.

7. Costos ABC [4]

El Método de Costos Basado en Actividades (ABC) mide el costo y desempeño de las actividades, basado en el uso de recursos. Este costeo plantea la diferenciación de un modelo contable y lo pone en un modelo gerencial en donde los recursos son consumidos por las actividades. Muestra la necesidad de examinar los procesos dentro de cada área de la empresa, junto con la clasificación de tareas y trabajos para determinar los costos. Se deben eliminar todas aquellas tareas que entorpezcan o no ayuden al desempeño eficaz de los factores productivos.

7.1. Pasos para implementación de costos ABC

Para realizar el costeo por actividades se deben seguir los siguientes pasos:

- Determinar el recurso.
- Identificar actividades.
- Identificar los elementos de costos de las actividades.
- Determinar los generadores de costos.
- Asignar los costos de las actividades.
- Asignar los costos directos a los productos.

Las actividades son clasificadas y ordenadas según su influencia en el producto. Pueden ser por producto, por lote, por línea de producto o por empresa. Hay que tener en cuenta la frecuencia de trabajo que use la actividad.

7.2. Procedimiento para la clasificación de actividades en el Costeo ABC

Para la clasificación de actividades se debe tener en cuenta:

Análisis de procesos o actividades: este proceso realiza un análisis del diseño de las actividades y así comprende las actividades que cada caso implica.

Identificación de los elementos del costo de cada proceso: se clasifican las tareas entre primarias o de apoyo y se identifican los inductores de costo para cada tarea.

Determinación del costo de los procesos operativos: se realiza el cálculo de los costos de las actividades primarias y de apoyo y finalmente se obtiene el total del costo de los procesos operativos.

La ventaja del desarrollo de Costos ABC, frente a otros métodos, para este tipo de industria es dada porque tiene en la cuenta los recursos, operaciones y productos, que incluye preparación y ejecución, siendo un sistema muy completo. [8]

8. Ventajas Costos ABC

- Identifica clientes, productos, proveedores, servicios u otros objetivos de costos no rentables.
- Permite calcular de forma precisa los costos, fundamentalmente determinados costos indirectos de producción, comercialización y administración.
- El modelo es aplicable a todo tipo de empresas de producción o de servicios, facilitando el proceso contable para la industria militar.
- Aporta información sobre las actividades que realiza la empresa, permitiendo conocer cuáles agregan valor y cuáles no, dando la posibilidad de poder reducir o eliminar éstas que no agregan valor.
- Permite relacionar los costos con sus causas,
- Identifica a los clientes, productos y canales menos provechosos.
- Determina los contribuidores y detractores verdaderos del desempeño financiero.

Estas ventajas apoyan el manejo contable y un mejor control sobre los procesos de mantenimiento en las fuerzas armadas.

Basados en esta metodología, se realiza el análisis y clasificación de actividades para la estimación del mantenimiento de Helicópteros MIL MI 17.

9. Aplicación del costeo ABC en los helicópteros militares

Dado que el método de costo basado por actividades (Costos ABC) mide el costo y desempeño de las actividades basado en el uso de los recursos, se establecen los siguientes recursos principales para evaluar las actividades en el mantenimiento de los helicópteros militares:

- Mano de Obra
- Partes Componentes
- Repuestos
- Tiempos de mantenimiento
- Capacidad Técnica

9.1. Clasificación de actividades

Las actividades establecidas para efectuar la evaluación y clasificación de costos son las siguientes:

Inspección de pre-vuelo: acercarse al helicóptero y revisar adecuadamente que el Sistema Integrado de Armamento y sub-sistemas se encuentren debidamente asegurados.

Formularios de mantenimiento: revisar y actualizar los formularios.

Revisión ventiladores: verificar que la entrada de aire de los motores, el ventilador, el cono de escape de los motores, al APU y los tubos pitot estén destapados y libres de objetos extraños.

Revisión compartimento: verificar que las tapas de las baterías, las tapas de los toma corriente y de la toma estática se encuentren cerradas y aseguradas.

Revisar condición: verificar el estado en que se encuentran: el blindaje, luces de navegación, espejos, indicador formación hielo, parabrisas y ventanas, tubos pitot, sistema corta cables, antenas ILS y DME, tren de nariz, estado del amortiguador, reflexión de las llantas, luz de aterrizaje y taxeo, luz anticollisión, luz de búsqueda Infrarroja, compartimiento de nariz, palas rotor principal, toma de aire de ventilación de cabina, ventana salida de emergencia, ventanas cabina de carga, la aplicación de esta metodología promueve el trabajo multidimensional bajo el principio de Pareto. [7]

Combustible: verificar que el tanque derecho de combustible se encuentre sin fugas y drenado, tapa interna y externa aseguradas, bandas de sujeción y pernos con frenado.

Cabina de carga: verificar estado de: paneles sistema eléctrico, techo cabina, asientos pasajeros, cinturones de seguridad, extintores contra incendios, compuerta y mecanismo de sujeción del sistema de carga externa, compuerta de carga y salidas de emergencia, rampa cabina de carga y salidas de emergencia, bomba hidráulica rampa y manija, luz compartimiento de carga, compartimiento de radios.

Motor: verificar que se encuentre en buen estado: sistema de rotor principal, uniones toma de aire arrancador neumático motor N.1, motor N.1, piso motor, acelerador, manetas de combustible, nivel de aceite.

10. Desarrollo de políticas militares para el cumplimiento de las etapas, bajo indicadores de gestión en los niveles de mantenibilidad

Partiendo de la clasificación de actividades, se generan unos niveles de mantenibilidad. Se evalúan diversos factores según lo exhaustivo de la revisión correspondiente en cada helicóptero. Cada uno de estos niveles tiene de unos requisitos académicos y tecnológicos de estricto cumplimiento sobre los cuales se destacan:

- El centro de capacitación debe contar con el aval de la Brigada de Aviación del Ejército de Colombia en los programas académicos y de vuelo.

- Total confidencialidad de la información y reproducción de los manuales usados en instrucciones.
- Certificación de Calidad ISO 9001 en los centros de entrenamiento para el mantenimiento de helicópteros militares.
- Mínimo siete (7) años de experiencia de los centros de capacitación.
- Entre otros.

Por confidencialidad no se puede profundizar en los indicadores de gestión y en las mejoras que se dieron bajo la implementación de costos ABC en el mantenimiento, pero se presentan los niveles con sus controles a continuación:

10.1. Nivel 1

El Nivel 1 evalúa superficialmente el estado del helicóptero. Se verifica la condición de los dispositivos, chequeo de los niveles de aceite, el aseguramiento de los equipos para cada misión, entre otros. Cuentan con listas de chequeo que deben ser diligenciadas por Tripulantes No Pilotos (TNP), antes y después de cada vuelo. Basándose en la figura 5 (Secuencia de Inspección), se efectúa la verificación de estado.

Gestión de la mantenibilidad: los TNP, se encargan de hacer la verificación exhaustiva de los helicópteros bajo los Manuales de Inspección establecidos por el Ejército Nacional de Colombia

Indicadores de gestión: los indicadores de gestión manejados en este nivel se encuentran basados en las planillas y listas de chequeo con las que cuenta cada tipo de helicóptero. En este caso se tienen listas de chequeo específicas para el Helicóptero MIL MI 17. Al finalizar cada periodo se evalúan los mayores índices de cambio en los helicópteros, basados en los parámetros y limitaciones del nivel correspondiente.

10.2. Nivel 2

Para este nivel, se establecen y controlan las potencias de cada una de las partes principales. Según los estándares internacionales y la ficha técnica del fabricante del Helicóptero MIL MI 17, existen unos criterios sobre los cuales la medición es la adecuada para ejecutar maniobras, tal como lo apreciamos en la figura 8.

Gestión de la mantenibilidad: sobre los resultados obtenidos en la gestión la mantenibilidad, se explica el trabajo realizado apoyándose en una gráfica de factores relevantes de cada uno, para un mejor entendimiento.

Pruebas de aceleración parcial: relación entre la temperatura máxima admisible de los gases y la temperatura del aire exterior durante la comprobación de la aceleración parcial.

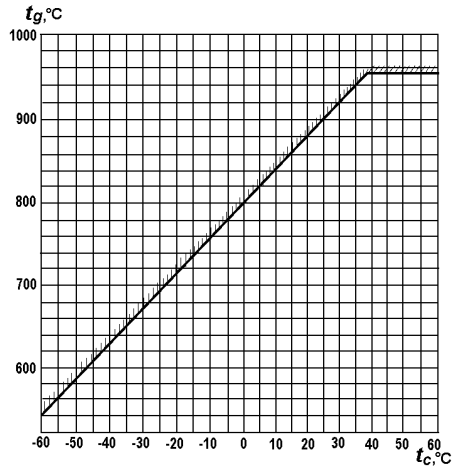


Figura 8.

Regímenes de funcionamiento de motores: función entre el número de revoluciones del turbocompresor y la temperatura del aire exterior a la entrada en el motor. Ver figura 9.

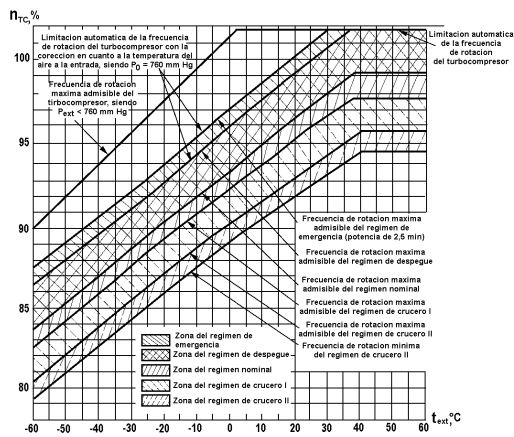


Figura 9.

Efecto viento dentro del efecto tierra: esta gráfica determina el incremento de la masa máxima en función de la velocidad y la dirección del viento durante el despegue y el aterrizaje. Ver figura 10.

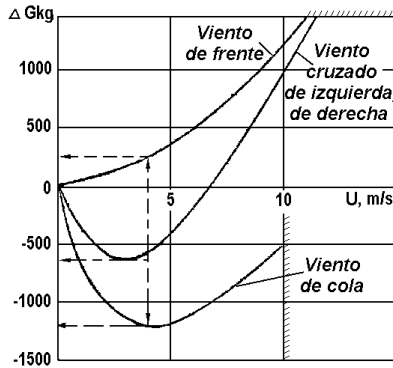


Figura 10.

Falla en un motor en vuelo de ascenso: determina la masa máxima admisible de despegue del helicóptero que corresponde a los requisitos de la categoría A (FAR-29) fallando un motor. Ver figura 11.

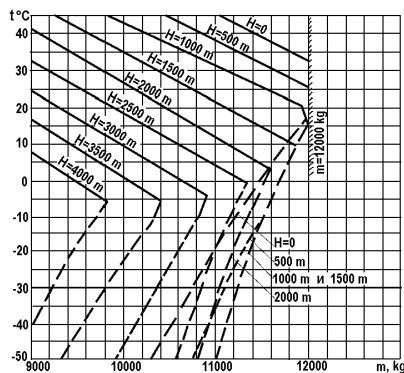


Figura 11.

Falla en un motor de vuelo recto y nivelado: masa máxima del helicóptero en vuelo horizontal con un motor operativo, $V_{a-ind} = 120 \text{ km/h}$ (SAH desconectado). Ver figura 12.

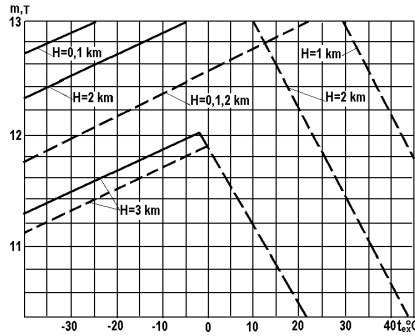


Figura 12.

Altura vs. velocidad: limitaciones de la masa de vuelo, al efectuar los vuelos estacionarios, vuelos a baja altitud y a ras de la tierra. Ver figura 13.

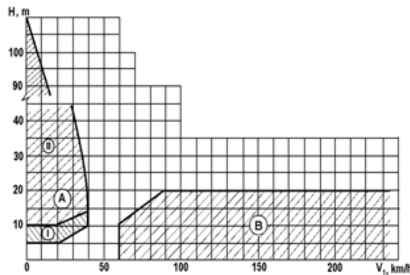


Figura 13.

Consumo de combustible: análisis de Combustible Mínimo por hora de vuelo. Ver figura 14.

Indicadores de gestión. Los indicadores de gestión para este nivel están dados por los resultados arrojados por cada una de a pruebas realizadas en laboratorio. (Laboratorios Ubicados en Tolemaida y Melgar, Colombia)

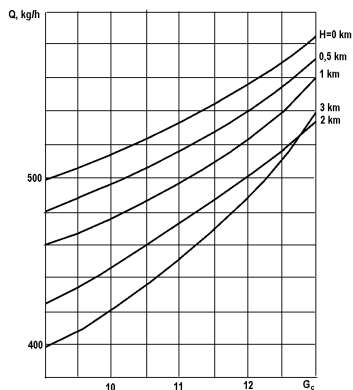


Figura 14.

10.3. Nivel 3

En este nivel, se contempla el desarme y reposición de piezas dañadas. Depende al mismo tiempo del tipo de helicóptero que se tenga para reparar. El límite de reconstrucción dentro de este nivel se encuentra en la estructura del helicóptero. Independiente del nivel que estos requieran existen unos costos fijos asociados a su mantenimiento. Los cuales se regulan con base en el presupuesto anual establecido y las misiones extra curriculares que se pueda presentar.

Helicópteros livianos. Este tipo de helicópteros se destaca por que se prestan a casi cualquier tipo de misión, con las inherentes limitaciones derivadas de su pequeño tamaño. Los costos asociados al mantenimiento de este tipo de helicópteros esta dado en la figura 15.

| | HELICÓPTERO | PROCEDENCIA | MANT MENSUAL | 1 HORA DE VUELO |
|----------|--------------|-------------|-----------------------------|-----------------|
| LIVIANOS | BELL 206 III | AMERICANO | \$ 6,500,000 - \$ 8,400,000 | \$ 2.200.000,00 |
| | AS 555 | FRANCES | \$ 6,500,000 - \$ 8,400,000 | \$ 2.200.000,00 |
| | BO 105 | ALEMAN | \$ 1.800.000,00 | \$ 950.000,00 |

Figura 15.

Helicópteros medianos. Este tipo de helicópteros se caracteriza por su gran capacidad en combate debido a su autonomía. Los costos asociados a este tipo de helicópteros esta dado por la figura 16, teniendo en cuenta que para estos se manejan horas de simulación. Específicamente para el helicóptero HUEY II (240 horas).

| | HELICÓPTERO | PROCEDENCIA | MANT MENSUAL | 1 HORA DE VUELO |
|----------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| MEDIANOS | HUEY II | AMERICANO | \$ 9.900.000,00 | \$ 3.400.000,00 |
| | BELL 212 | FRANCES | | |

Figura 16.

Helicópteros pesados. Su principal labor radica en el transporte de soldados equipados, así como misiones de largas horas de vuelo y distancias. El helicóptero MIL MI 17 se encuentra en esta clasificación. Para el caso del helicóptero MIL MI 17- MD, (uno de los helicópteros más grandes, con los que cuenta la Fuerza Aérea Colombiana), la capacidad de transporte es de 28-35 soldados armados, con tanques de gasolina adicionales externos y con posibilidad de tener hasta 8 horas de vuelo. Ver figura 17.

| | HELICÓPTERO | PROCEDENCIA | MANT MENSUAL | 1 HORA DE VUELO |
|---------|-------------------|-------------|------------------|-----------------|
| PESADOS | UHS60L-BLACK HAWK | RUSO | \$ 11.400.000,00 | \$ 4.500.000,00 |
| | MIL MI 17 - IV | RUSO | | |
| | MIL MI 17 - V | RUSO | | |
| | MIL MI 17 - MD | RUSO | | |

Figura 17.

Gestión de la mantenibilidad. Debido a las variaciones que tiene este nivel de mantenimiento, los controles son difíciles. Pese al control que se lleva a cabo en niveles anteriores, el control sobre cada clasificación se vuelve más exhaustivo y más completo. Sin embargo, los formatos indexados previamente, convierten al siguiente nivel en un canal más acertado para la verificación de la información, evitando errores.

Indicadores de gestión. Los Indicadores de gestión en este nivel, se basan en los costos fijos de mantenimiento y las variaciones de los mismos, según las misiones a las cuales hayan tenido que ser sometidos los helicópteros. Dependiendo de las rutas o misiones, se manejan diversas horas que influyen directamente sobre los resultados obtenidos para cada una de las clasificaciones de los helicópteros asociados.

10.4. Nivel 4

Este nivel se presenta cuando la estructura del helicóptero se ve afectada de manera sustancial. Implica ruptura de la estructura general de la nave o del rotor de la cola. En este caso, el mantenimiento no se realiza en los laboratorios de CAMAN, (Comando Aéreo de Mantenimiento), si no en la casa matriz del helicóptero afectado.

Gestión de la mantenibilidad. Esta gestión de mantenibilidad va ligada a las misiones a las cuales está expuesta la nave. Estas misiones, en la mayoría de las ocasiones están destinadas a los helicópteros pesados, debido a la característica de los mismos y su capacidad en tiempos de vuelo.

Indicadores de gestión. Los buenos resultados en estos indicadores, evitan pérdidas humanas. De este modo, los controles en mantenimiento y en misiones son de mayor importancia.

11. Extensión hacia los helicópteros civiles

El mantenimiento en los helicópteros de uso civil, es menos complejo ya que en este no se hacen inspecciones en armamentos y no se hace verificación de antiexplosivos tan detallada, ya que es menos frecuente este tipo de acontecimientos en estas aeronaves.

Básicamente el mantenimiento de estas aeronaves es el mismo, la variación es en el tipo de equipo de comunicación que cada uno de estos lleva (el de un helicóptero militar es más complejo), mientras que sus partes componentes son las mismas. Por lo tanto el chequeo de la aeronave en cuanto a mantenimiento como tal de piezas en general es semejante.

12. Conclusiones

- A partir de la entrevista hechas sobre el proceso para la clasificación y el control de las operaciones, llevadas a cabo en el mantenimiento preventivo y correctivo de los Helicópteros en Colombia, se puede inferir el mejoramiento de las actividades realizadas en cada una de las etapas para la reducción de costos.
- Los documentos investigados muestran que el manejo de costos ABC dentro de la industria militar, ayuda a generar un orden contable, dando transparencia para control interno.
- Del mismo modo la claridad en los procesos bajo los cuales la TNP, la ejecución de las labores de mantenimiento demuestra el alcance de los procesos, evitando fallas parciales o hasta mortales.
- La clasificación de niveles y actividades ante la implementación de una metodología ABC, permite tanto a la organización como al ejecutor de las actividades tener mejores resultados, mayores controles y un mejor desempeño de las mismas.
- La claridad en los procesos genera un mejor nivel de ejecución, optimizando los tiempos y la calidad de la actividad realizada.
- Basados en estas clasificaciones, los indicadores de gestión implementados muestran de forma verídica, los resultados obtenidos mediante la estandarización de los procesos, permitiendo así que la información arrojada por el modelo sea lo más real y tangible.

Referencias

1. Colombia, FF. MM.: Manual De Entrenamiento De Tripulación. Bogotá. (2007)
2. Fuerzas Militares, Historia. (s.f.). [en línea] Recuperado el 16 de Mayo de 2010 de <http://www.fuerzasmilitares.org/aviacion/historia.html>. (2010)
3. FULLPLANE. (s.f.): Fullplane. [en línea] Recuperado el 17 de Mayo de 2010, de <http://www.fullplane.com.ar/eetn4/introduccion-basica.htm>. (2010)
4. Hicks, D.: El sistema de Costos basado en las Actividades (ABC): guía para su implantación en pequeñas y medianas empresas. Mexico D.F: Alfaomega. (1998).
5. Mantenimiento de Helicópteros, Galeón. (s.f.). [en línea] Recuperado el 16 de Mayo de 2010, de http://heliobsesion.galeon.com/manten_de_helis.htm. (2010)
6. Teniente, F. C.: Mantenimiento de Helicópteros. (P. Tapiero., Entrevistador) (2010).
7. Ferhan, C., Cengiz, K., Bersam, B.: A Multiattribute ABC Classification Model Using Fuzzy AHP. Istanbul Technical University. (2011).
8. Yang, X., Zhang, Q.: The Research of Military Logistics Cost Accounting. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. China. (2012).



Comportamiento de la productividad en empresas del *cluster* plásticos establecidas en Bogotá D.C. dedicadas a la manufactura de envases, empaques y embalajes entre años 2003 a 2009

Andrés Giovanni Guarín Salinas*

Universidad de América

FECHA DE ENTREGA: 1 DE NOVIEMBRE DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 20 DE ENERO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 28 MARZO DE 2014

Resumen El artículo hace una aproximación al estado de la productividad en el sector de plásticos en la ciudad de Bogotá, bajo los términos planteados en la función de producción de Cobb-Douglas, con el objetivo de establecer los puntos conexos entre un tipo de producto industrial específico y las posibles variaciones presentadas en relación al uso del capital, la fuerza de trabajo y la apropiación de tecnología. El documento está compuesto por cuatro partes, la primera de ellas, a manera de introducción, contextualiza el entorno bajo el cual opera la competitividad, vinculando dicho concepto con el sentido real que debe dársele a la productividad, resaltando su importancia para las organizaciones empresariales en la búsqueda de generar mayores beneficios. La segunda y tercera parte, respectivamente, describen el marco teórico y la metodología bajo la cual se fundamentó la investigación, particularmente la construcción del índice de Tornqvist-Theil y el análisis de la función de producción. Por último, se establecen las conclusiones a partir del análisis a dos modelos cuantitativos planteados.

Abstract This article indicates the productivity status in the plastic cluster sector in the city of Bogotá, under the terms set by the production function of Cobb-Douglas in order to establish the related points between a specific industrial product and the possible variations presented regarding the use of capital, the labor force, and the appropriation of technology. This document has four parts: the first one contextualizes—as an introduction—the environment where competitiveness operates, by

* Artículo de investigación científica y tecnológica, que hace parte del conjunto de resultados del proyecto de estructuración de un modelo de competitividad para el clúster de plástico en la ciudad de Bogotá D.C., diseñado por el Centro de Investigación y Desarrollo Empresarial (COL0041544), bajo la línea de investigación en Lean Manufacturing, entre Marzo y Agosto de 2012. Más información en andres.guarin@profesores.uamerica.edu.co

tying that concept to the real sense to be attributed to productivity. This way, we highlight its importance to the companies when looking to generate more benefits. The second and third parts describe the theoretical framework and the methodology used to base the research, respectively, emphasizing on the construction of the Tornqvist-Theil index and the analysis of the production function. Lastly, we established the conclusions after analyzing two quantitative models previously outlined.

Palabras Clave: *cluster*, competitividad, crecimiento, producción, productividad. JEL: C10, C020, C200, L590, L690.

Keywords: cluster, competitiveness, growth, production, productivity. JEL: C10, C020, C200, L590, L690.

1. Introduccción

1.1. Marco conceptual

A partir del momento en que Milton Friedman, al inicio de la década de los setenta, declaró como una especie de *naturalis principia* “que cualquier variación de la masa monetaria es seguida por una variación en el mismo sentido de los precios, de la producción y de los ingresos” [1]; se desencadenó un efecto creciente a escala mundial que en esencia consideraba el rol y la estructura del libre mercado más que suficiente, para asegurar la distribución óptima de los recursos y el uso efectivo de las capacidades de producción.

La corriente de pensamiento económico (con ciertos matices políticos reaccionarios), que se derivó de estos análisis, sentaron las bases de una ideología que redefiniría y dominaría de manera amplia, la visión capitalista del mundo durante el último cuarto del siglo XX y la primera década del siglo XXI; hasta el surgimiento en el año 2007 de la crisis económica mundial que afectó y puso contra las cuerdas a importantísimas instituciones financieras y que a partir de 2008 comprometió el nivel de empleo y los ingresos en nombre del pago de la deuda pública acaecida como consecuencia de los planes de rescate.

A pesar de lo anterior y de su comprobado desgaste histórico, la ideología neoliberal sigue profundamente arraigada en la mente de muchos analistas económicos y domina la agenda de muchos gobiernos; y aunque está en proceso de revisión, muchas de sus prácticas aún presentan vigencia debido entre muchos factores, al surgimiento en paralelo de un fenómeno que se encuentra enmarcado dentro de la interdependencia global actual; que lo hace concreto, visible y medible; y lo más relevante, que ha logrado sintetizar todo el conjunto de actividades humanas a un esquema de libre competencia, donde en teoría, los mejores prevalecerían siempre y cuando se mantengan en una constante dedicación, creatividad e inventiva, trayendo como consecuencia directa un “bienestar general”.

El fenómeno descrito, es conocido como competitividad y ha logrado en el plazo de solo unas décadas impulsar una carrera desbocada para ocupar los primeros lugares dentro de un amplísimo conjunto de indicadores de todos los sabores y tendencias, establecidos principalmente por organizaciones multilaterales de

las más disímiles características, las cuales construyen escalafones donde sitúan y posicionan a los diferentes países y por extensión, a las regiones, ciudades y organizaciones que hacen parte de su entramado social; en relación a su habilidad para ser más productivo y así generar proporcionalmente más riqueza que los competidores directos.

Colombia, no es ajena a este fenómeno y a partir de la década de los noventa hace su apropiación de los principios rectores del neoliberalismo, en cierta medida bajo el influjo de un relevante hecho histórico, como fue el de establecer un nuevo contrato social.

La Constitución que vio la luz en 1991, le hizo una gran apuesta a la modernidad y más aún a la postmodernidad [2], y fue escrita por los representantes que en su momento planteaban esas tesis y que en un afán de configurar un Estado más incluyente, crearon un grupo de derechos inalienables para todos los ciudadanos, que en la práctica resultaban muy costosos de implantar; por lo tanto se afirmó que el mercado debería actuar de una forma más directa y funcionar con menos regulación, sin llegar a tocar la distribución de la riqueza. El pacto social conformado entonces y que rige desde ese momento, no dejó establecido como aumentar en serio la productividad y como organizar la carga tributaria para lograr satisfacer los derechos de todos.

1.2. Panorama de la Productividad

Dentro del contexto anterior, se vislumbra que el camino más directo para alcanzar una mejor y sostenible calidad de vida, es mediante el aumento directo en los niveles de productividad de las empresas, que trae consigo una competitividad *in crescendo* que facilita el acceso a mercados; y por lo tanto a un aumento de las exportaciones, que se refleja en el aumento gradual de los ingresos per cápita de la población [3]. Un constante aumento en la productividad, coadyuva en el control a problemas estructurales de la economía, como la inflación, el desempleo, una balanza comercial deficitaria y una paridad monetaria inestable.

Colombia actualmente presenta bajos niveles de productividad y en promedio corresponde a un 20% de la productividad de un trabajador en los Estados Unidos; país con el cual se ha establecido un Tratado de Libre Comercio, desde Mayo 15 de 2012; lo que significa que se requieren de cinco trabajadores en Colombia para alcanzar el mismo nivel de producto que logra un trabajador norteamericano en una hora.

La principal causa para que se presente este nivel tan bajo en la productividad colombiana, tiene que ver con la baja eficiencia con la que se usan los recursos disponibles, la cual está estrechamente asociada a múltiples variables que explican el rezago en términos de competitividad, como son la informalidad empresarial, bloqueos para acceso a crédito, infraestructura y servicios logísticos precarios, poca innovación y desarrollo (traducido esto último en pocas patentes susceptibles de ser explotadas comercialmente).

1.3. Iniciativa frente a la competitividad

La ciudad de Bogotá D.C. y su área metropolitana, es la conurbación más representativa que tiene Colombia en términos de crecimiento industrial y de potencial de negocios; solamente esta región hace un aporte al PIB por encima del 30 % del total nacional y emplea cerca del 9,8 % de toda la fuerza productiva del país; lo que la convierte en el foco de atención de muchos inversionistas y de muchas iniciativas que buscan hacerla más competitiva.

En esta región coexisten muchas instituciones de fomento al desarrollo económico, que buscan captar recursos locales, nacionales e internacionales, para el financiamiento de programas que permitan a diferentes sectores, mejorar las condiciones de operación técnica y hacerlos más atractivos a potenciales inversionistas.

En este sentido, sobresale una institución que por sus características se ha convertido *de iure* en un organismo consultivo de primer nivel y que en teoría tiene el propósito ulterior de aumentar la prosperidad de los habitantes de Bogotá, al ejecutar una propuesta de valor encaminada a hacer fuerte la red de empresas que la componen y mejorar con esto el grado de competitividad de la región; esta organización es la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), la cual suscribió el 22 de Septiembre de 2008 con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el convenio ATN/ME-11056, el cual dentro de su marco lógico de acción, tenía como fin, aumentar la competitividad y generar nuevas oportunidades de mercado para las PYME, con un aumento del 5 % en su productividad.

La naturaleza de este convenio entró en absoluta concordancia con los lineamientos establecidos por la Comisión Regional de Competitividad (CRC) y sus ejes estratégicos transversales (estrategia V), entre los cuales se destaca el sectorial de apoyo a la transformación productiva y desarrollo de clústers, entre los que se encuentra el de plásticos (proyecto B-9), orientado principalmente al diseño y desarrollo de nuevos empaques, envases y embalajes que permitan alargar la vida útil y el transporte de los productos obtenidos en los sectores de alimentos, agroindustria y cosmética.

1.4. Características del sector plásticos en Bogotá D.C.

De la revisión de dos estudios técnicos, ver [4] y [5], que hacen una aproximación del sector de plásticos en Bogotá, se logra identificar en primera instancia que este sector es considerado aún una derivación de la industria petroquímica y por lo tanto presenta un alto nivel de dependencia, convirtiéndolo por reflejo, en uno de los de mayor dinamismo al ser arrastrado por el impulso reciente de la industria petrolera; permitiéndole desarrollar una incipiente tendencia exportadora, así como con una presencia importante de inversión extranjera.

Sin embargo al analizar el sector de manera más profunda, se encuentran algunas características vitales que deben ser atendidas para ganar competitividad, tanto en el ámbito nacional como en el entorno continental. Así, se identifica en primer lugar, que los niveles de calidad de los productos hechos en el clúster, son bajos, ya que las empresas (principalmente las PYMES), no cuentan con la

tecnología y la infraestructura suficiente para producir bienes sofisticados que sean el resultado de procesos estructurados de innovación, que a su vez provengan de investigaciones estratégicas de nuevos mercados y de desarrollo estratégico de nuevos materiales, que permitan una usabilidad acorde con las exigencias actuales de impacto ambiental y de confort.

Las principales causas de la problemática arriba expuesta, corresponden en primera instancia, a la reducida gama de materias primas empleadas para poder manufacturar bienes con un alto valor agregado, en parte debido a la falta de una integración más fuerte con los proveedores de resinas plásticas; la segunda causa, es la imposibilidad de acceso a recursos de capital para invertir en tecnología, que incide de manera directa en el incremento de la calidad de los productos; la tercera causa, es la muy poca alianza entre empresas, centros de investigación e instituciones de fomento; que estén en capacidad de brindar el apoyo requerido, para hacer una sostenible reconversión industrial y una profunda capacitación de la fuerza laboral, en términos de mejoramiento continuo de los procesos de producción y el desarrollo de competencias laborales idóneas.

2. Marco teórico

El concepto de productividad, que esta implícitamente vinculado con el de competitividad, recibe una constante atención principalmente por parte de los productores [6], los cuales usan la información derivada de su medición, para lograr identificar una distinción entre los movimientos que representan las diferentes combinaciones de los factores productivos¹ (independientemente de las proporciones que se usen), que permitan dar como resultado una cantidad determinada de producto, en respuesta a los cambios que surgen de las fluctuaciones de los precios relativos de estos mismos factores.

Así, si a un sector industrial le interesa determinar su productividad, debe estudiar los distintos niveles de producción, determinados en un mapa de múltiples posibilidades, que deben orientar las decisiones gerenciales hacia dos escenarios complementarios; el primero tiene que ver con la necesidad de establecer nuevas inversiones, que propicien un desarrollo gradual a nivel tecnológico; el segundo escenario, busca producir un efecto agregado de reducción de costos reales por medio de una reorganización empresarial, principalmente a nivel de los procesos industriales. El uso en conjunto de ambos escenarios, constituye un mecanismo para ir cerrando la brecha de conocimiento y de progreso, que incide de forma directa en el aumento de la competitividad [1].

La medida residual de la productividad de factores, también conocida como productividad total factorial (PTF), identificada como A , puede llegar a explicar hasta un tercio del crecimiento, de acuerdo a los trabajos realizados en este campo por el premio Nobel Robert Solow; donde su modelo de crecimiento exógeno, se explica y describe bajo la función de producción Cobb-Douglas (ecuación 1).

¹ Principalmente Capital y Trabajo, pero se consideran otros, como la adopción de tecnología, la desregulación de los mercados, la estabilidad jurídica, los derechos de propiedad intelectual, la disponibilidad de los insumos, consumo de energía, etc.

$$y = A_{\varphi}^t k^{\alpha} (h)^{1-\alpha} L \quad (1)$$

Esta función de producción dado su homogeneidad, presenta un comportamiento multiplicativo importante, donde todas las variables que la componen, capital físico en planta y equipos (k); fuerza de trabajo disponible (h); el trabajo, representado en el número de horas puestas a disposición del sistema productivo (L); al ser influenciadas por A logran ofrecer rendimientos de escala constantes. Igualmente esta función tiene la propiedad de que α y $1 - \alpha$, representan la participación del capital y de mano de obra, respectivamente.

De los dos enfoques existentes para medir la productividad de factores, se ha escogido para esta investigación, el que utiliza números índices, ya que representa la cuantificación de los productos finales manufacturados (*outputs*), en proporciones relativas al ingreso; en relación con los factores productivos (*inputs*) que se emplean para la generación de estos mismos productos, representados en proporciones relativas al costo.

De lo anterior, la productividad de factores, se establece como la razón de un índice de *outputs* (Q), respecto a un índice de *inputs* (X), en un periodo base φ para un periodo de análisis t .

$$A_{\varphi}^t = \frac{Q}{X} \quad (2)$$

De los índices número más representativos, incluyendo el de Laspeyers y Paasche, para hacer la medición de la productividad de factores y que logra satisfacer todas las pruebas de inversión del tiempo, de precios y cantidades necesarias para no incurrir en sesgos estadísticos; está el de Tornqvist-Theil, el cual es un índice de cadena, que recoge los cambios estructurales ocurridos en un periodo de tiempo analizado; y requiere para su construcción, datos sobre cantidades de productos y sus factores, junto con sus correspondientes precios, que permitan ponderar el valor asignado a cada bien en la agregación.

El índice Tornqvist-Theil, es considerado un índice superlativo, lo que significa que puede llegar a ser exacto para funciones flexibles, al darles un tratamiento igual a los precios y a las cantidades, en todos los periodos. Las simetrías que establece este índice, proporcionan aproximaciones de segundo orden, cercanas a los índices que miden el costo de vida.

Por lo tanto, el índice de Tornqvist-Theil, en un tiempo t , para una serie de *outputs*, se puede calcular de acuerdo a los elementos planteados en la ecuación 3.

$$P_t = \prod_{i=1}^n \left(\frac{p_{i,t}}{p_{i,\varphi}} \right)^{\frac{1}{2} \left[\frac{p_{i,\varphi} \cdot q_{i,\varphi}}{p_{\varphi} \cdot q_{\varphi}} + \frac{p_{i,t} \cdot q_{i,t}}{p_t \cdot q_t} \right]} \quad (3)$$

Donde se requiere los datos de precios y cantidades de dos periodos de tiempo (φ y t), para cada uno de los n artículos que se indexan a partir de $i = 1$ hasta $i = n$; así, $p_{i,\varphi}$ y $q_{i,\varphi}$, es el precio y la cantidad, respectivamente, del artículo i en el periodo de base φ ; a su vez, $p_{i,t}$ y $q_{i,t}$, es el precio y la cantidad, respectivamente, del artículo i en el periodo de análisis t ; igualmente p_{φ} y q_{φ} ,

son los precios la tabla 4 y cantidades del periodo base; p_t y q_t representan los precios y cantidades del periodo de análisis.

Análogamente, el índice de Tornqvist-Theil, en un tiempo t , para una serie de *inputs*, se puede calcular mediante los elementos establecidos en la ecuación 4.

$$C_t = \prod_{i=1}^n \left(\frac{c_{i,t}}{q_{i,\varphi}} \right)^{\frac{1}{2} \left[\frac{c_{i,\varphi} \cdot q_{i,\varphi}}{c_\varphi \cdot q_\varphi} + \frac{c_{i,t} \cdot q_{i,t}}{c_t \cdot q_t} \right]} \quad (4)$$

Donde se requiere los datos de costos y cantidades de dos periodos de tiempo (φ y t), para cada uno de los n artículos que se indexan a partir de $i = 1$ hasta $i = n$; así, $c_{i,\varphi}$ y $q_{i,\varphi}$ es el costo y la cantidad, respectivamente, del artículo i en el periodo de base φ ; a su vez, $c_{i,t}$ y $q_{i,t}$ es el costo y la cantidad, respectivamente, del artículo i en el periodo de análisis t ; igualmente c_φ y q_φ , son los precios y cantidades del periodo base; c_t y q_t representan los costos y cantidades del periodo de análisis.

3. Metodología y análisis de resultados

3.1. Productividad de factores

Para el análisis del comportamiento de la productividad en el clúster de plásticos en Bogotá D.C., se analizaron 26 tipos diferentes de producto, clasificados en 4 grupos, de acuerdo a las características de usabilidad en el segmento de empaques, envases y embalajes, según la codificación establecida por la Encuesta Anual Manufacturera (EAM), emitida por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para los años 2002 al 2009, ver cuadro 1.

De la caracterización de los productos, se obtuvieron las cantidades producidas y su costo, al igual que el precio y las cantidades vendidas en los años referenciados.

Simultáneamente, se analizaron los tres principales procesos industriales² de transformación del plástico (Extrusión, Inyección y Soplado), clasificados según los cambios de estado que sufre la resina a lo largo de la línea de fabricación para producir el tipo de producto final acorde a la codificación del DANE, para determinar el consumo de energía eléctrica (Kwh/Kg de producto), de los sistemas auxiliares hidráulicos, neumáticos, de refrigeración y de aire comprimido, que comprometen un nivel de avance tecnológico, donde se establece cierto progreso del proceso industrial frente al uso eficiente de la energía.

En este orden de ideas, el cálculo del número índice para *outputs*, teniendo como base el año 2002, al aplicar la ecuación 3, dio como resultado los valores expresados en el cuadro 2.

A lo anterior se añade, la medición del flujo de servicios derivados del trabajo, donde se asume una proporción fija del total de horas trabajadas, la cual refleja

² El plástico es moldeado a través de un conjunto de procesos primarios de tipo térmico, donde el material pasa de estado líquido y finalmente se solidifica. En procesos secundarios, como termoformado, doblado, laminado, sellado, cortado, impresión y peletizado entre otros se definen las características propias del producto final.

| | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Item | Grupo I: Bolsas y Sacos de Material Plástico |
| 1 al 3 | 36410043 - 36410051 - 36410060 |
| Item | Grupo II: Envases, Cajas, Estuches, Tapas, Empaques, Tambores, Cintas, Zuncho, Rejillas, Redes, de Material Plástico Multiuso |
| 4 al 20 | 36490021 - 36490039 - 36490055 - 36490063 - 36490071 - 36490080 - 36490098 - 36490101 - 36490136 - 36490144 - 36490161 - 36490187 - 36490195 - 36490225 - 36490268 - 36490314 - 36490349 |
| Item | GRUPO III: Vasos, Regaderas, Baldes de Material Plástico |
| 21 al 23 | 36940034 - 36940051 - 36940131 |
| Item | GRUPO IV: Artículos N.C.P. de Plástico Espumado Rígido y Flexible |
| 24 al 26 | 36999144 - 36999152 - 36999551 |

Cuadro 1. Codificación DANE para productos plásticos.

| Año (t) | P_t |
|-------------|-------------|
| 2003 | 1,120083285 |
| 2004 | 1,191423397 |
| 2005 | 1,243025838 |
| 2006 | 1,256170454 |
| 2007 | 1,291470414 |
| 2008 | 1,328887939 |
| 2009 | 0,930503732 |

Cuadro 2. Índice para *outputs*.

la intensidad laboral a lo largo del proceso de fabricación, como una medida directa de la utilización de los recursos de producción. Así, el trabajo como factor de producción se descompone según la educación, sexo y ocupación; y son homologadas por la EAM en tres categorías: empleados administrativos, técnicos y obreros; cada uno de los componentes se pondero por su tasa de salario y de prestaciones sociales.

A su vez, los materiales intermedios que se consideraron como factor de producción, se dividieron en tres categorías: i) materias primas domésticas, ii) materias primas importadas y iii) costos indirectos de fabricación. En esta última categoría se incluyó los gastos de consumo en artículos complementarios como compra de repuestos y accesorios, trabajos de mantenimiento, subcontratación industrial, consumo de lubricantes y combustibles. Los anteriores elementos fueron ponderados para inferir su valor, por lo tanto esta variable se define como las compras netas de inventarios de materias primas más los costos indirectos de fabricación. En este orden de ideas, el cálculo del número índice para Inputs,

teniendo como base el año 2002, al aplicar la ecuación 4, dio como resultado los valores expresados en el cuadro 3.

| Año (t) | C_t |
|-------------|------------|
| 2003 | 1,12705501 |
| 2004 | 1,19124266 |
| 2005 | 1,26770137 |
| 2006 | 1,25620501 |
| 2007 | 1,31922910 |
| 2008 | 1,32962125 |
| 2009 | 0,93739623 |

Cuadro 3. Índice para *outputs*.

En concordancia con los datos anteriores, el cálculo de la productividad de factores, una vez determinados los índices de *outputs* e *inputs*³ respectivamente, mediante la ecuación 2, arrojó los resultados expresados en el cuadro 4.

| Año (t) | A_φ^t |
|-------------|---------------|
| 2003 | 0,99381421 |
| 2004 | 1,00015172 |
| 2005 | 0,98053522 |
| 2006 | 0,99997249 |
| 2007 | 0,97895841 |
| 2008 | 0,99944848 |
| 2009 | 0,99264719 |

Cuadro 4. Productividad de factores.

Una $A < 1$, indica que la productividad para ese periodo en particular, representó un uso deficiente de los recursos de producción, por lo tanto se está perdiendo competitividad.

En contraste, cuando $A > 1$, en un periodo en particular, se está haciendo un uso eficiente de los recursos de producción, que permite ir ganando competitividad.

³ Los índices tanto de *outputs* como de *inputs*, cumplen con las propiedades de carácter matemático para este tipo de medida estadística.

Cuando $A = 1$, significa que existe una coincidencia tanto en el periodo base como en el de análisis, que refleja una variación nula, por lo tanto se mantiene estático.

Al llevar los resultados a un plano de coordenadas (Figura 1), se puede inferir que A para el sector de plásticos en Bogotá D.C., presenta una oscilación entre 0.9789 y 1.0001, la cual es una franja débil en términos de productividad, donde se puede deducir que este sector industrial, a pesar de su reconocido potencial, es poco dinámico, dado a mantener su participación en el mercado, con pocas variaciones en el uso de los recursos de producción y con productos poco diferenciados que no comprometen el uso de nuevas tecnologías.

Al analizar la medición de A con otro tipo de factores [7], como son el de Prosperidad Económica (FPE) y el de Concentración del Empleo (FCE), el clúster de estudio puede definirse como uno que solamente logra abastecer el mercado local y se encuentra aún lejos de llegar a establecerse en comercios internacionales de amplias exigencias técnicas y normativas.

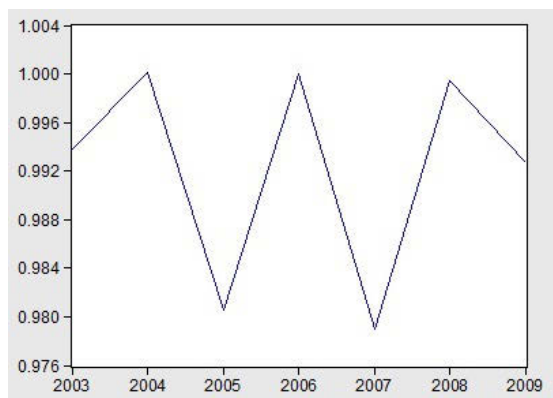


Figura 1. Serie de productividad de factores A .

Igualmente cabe resaltar, que ante la inspección a la figura 1, de la serie de A , se refleja la presencia de tres ciclos de negocios, caracterizados por la alternancia entre fases de expansión (valle a pico), donde se presenta un incremento de la actividad económica agregada; y de contracción (pico a valle), donde por el contrario se presenta una reducción significativa de la actividad económica.

En el flujo constante entre picos y valles de la figura 1, se identifican cuatro puntos de quiebre, de los cuales se resalta uno en particular, que hace parte de la cronología de estudio, y es el periodo comprendido entre los años 2007 a 2009, ya que en esta franja de tiempo se evidencia el inicio de un ciclo de expansión, que es constatado mediante el análisis del Factor de Dependencia del Clúster (FDC) [7].

De la observación anterior se puede establecer un marco de referencia para el seguimiento de los factores de producción en años posteriores de acuerdo a la tendencia que se insinúa.

3.2. Función de producción

Dentro del análisis econométrico llevado a cabo durante la investigación, se establecieron dos modelos a partir de la linealización de la función de producción, es decir, aplicando logaritmos a las variables originales de la ecuación 1. Así, en el primer modelo, expresado según los términos de la ecuación 5, la función de producción toma las características de una función monótona creciente en sus variables, k capital, L trabajo y h fuerza laboral disponible; la función expresada de esta forma, indica que el producto puede llegar a incrementarse por tres razones fundamentales; primero, que las personas trabajen más (un mayor nivel de L), segundo, porque tienen más equipo para trabajar (una k más elevada), o tercero, porque el capital y el trabajo se utilizan en la producción de forma más eficiente (un nivel de A más elevado).

$$\log y = \beta_0 + \beta_1 \log k + \beta_2 \log h + \beta_3 \log L + \mu \quad (5)$$

Al sistematizar los datos, se muestra a la función de producción bajo la estimación de la ecuación con los coeficientes sustituidos (Figura 2).

$$LY = C(1) + C(2) \cdot LK + C(3) \cdot LH + C(4) \cdot LL \quad (6)$$

$$LY = 0.2066 + 3.5787 \cdot LK - 0.6539 \cdot LH + 0.1594 \cdot LL \quad (7)$$

| Dependent Variable: LY Method: Least Squares Date: 06/26/12 Time: 14:53 Sample: 2003 2009 Included observations: 7 | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------|--------|
| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
| C | 0.206614 | 2.003500 | 0.103127 | 0.9244 |
| LK | 3.578762 | 1.741687 | 2.054767 | 0.1322 |
| LH | -0.653999 | 1.284936 | -0.508974 | 0.6458 |
| LL | 0.159405 | 0.369885 | 0.430959 | 0.6956 |
| R-squared | 0.599945 | Mean dependent var | -2.678092 | |
| Adjusted R-squared | 0.199890 | S.D. dependent var | 0.131773 | |
| S.E. of regression | 0.117869 | Akaike info criterion | -1.142925 | |
| Sum squared resid | 0.041679 | Schwarz criterion | -1.173833 | |
| Log likelihood | 8.000237 | Hannan-Quinn criter. | -1.524948 | |
| F-statistic | 1.499656 | Durbin-Watson stat | 1.212454 | |
| Prob(F-statistic) | 0.373599 | | | |

Figura 2. Coeficientes para el modelo 1.

El segundo modelo propuesto para el estudio, toma la expresión de la ecuación 8; donde la función de producción se plantea en términos de la relación del

producto por unidad de mano de obra, estableciendo que sólo es posible obtener algo de producto usando una mínima cantidad de trabajo L , dado el supuesto que la función de producción es homogénea en grado 1.

$$\log \frac{y}{L} = \beta_0 + \beta_1 \log k + \beta_2 \log h + \mu \quad (8)$$

Lo anterior conlleva a establecer que las productividades marginales de las variables son positivas al igual que decrecientes, donde por cada unidad adicional de una de ellas, el beneficio generado disminuye al aumentar la cantidad de dicha variable.

Al sistematizar los datos, se muestra a la función de producción bajo la estimación de la ecuación con los coeficientes sustituidos (Figura 3).

$$LYSOBREL = C(1) + C(2) \cdot LK + C(3) \cdot LH \quad (9)$$

$$LYSOBREL = 1.4463 + 4.3522 \cdot LK - 0.0699276 \cdot LH \quad (10)$$

| Dependent Variable: LYSOBREL | | | | |
|------------------------------|-------------|-----------------------|-------------|--------|
| Method: Least Squares | | | | |
| Date: 06/26/12 Time: 14:57 | | | | |
| Sample: 2003 2009 | | | | |
| Included observations: 7 | | | | |
| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
| C | 1.446338 | 2.754236 | 0.525132 | 0.6273 |
| LK | 4.352277 | 2.440355 | 1.783460 | 0.1491 |
| LH | -0.069928 | 1.798681 | -0.038877 | 0.9709 |
| R-squared | 0.443045 | Mean dependent var | -2.682614 | |
| Adjusted R-squared | 0.164568 | S.D. dependent var | 0.184240 | |
| S.E. of regression | 0.168399 | Akaike info criterion | -0.427439 | |
| Sum squared resid | 0.113432 | Schwarz criterion | -0.450621 | |
| Log likelihood | 4.496037 | Hannan-Quinn criter. | -0.713957 | |
| F-statistic | 1.590957 | Durbin-Watson stat | 1.825474 | |
| Prob(F-statistic) | 0.310198 | | | |

Figura 3. Coeficientes para modelo 2.

Del análisis de resultados de los dos modelos, se deja entre ver la presencia de dos hechos importantes, que se incluyen por razones de coherencia y porque parecen indicar el rumbo que debe tomar la investigación a futuro. El primer hecho, es que aunque el nivel de los coeficientes es relativamente bajo, lo que hace entender que no existe un ajuste acorde entre las variables, se presupone que esto no excluye que existan otras relaciones funcionales entre las mismas; como es el caso del impacto de la acumulación de capital humano, en términos del grado de educación de la fuerza de trabajo y el desarrollo de competencias que establezcan un conjunto de destrezas laborales propias para los procesos de transformación del plástico.

Para este acercamiento en primer lugar se propone una tasa de inversión de capital humano que proporciona una conexión entre los costos y el crecimiento educativo; en segundo lugar, todavía hay retornos constantes a los tres factores (k , L y h), y retornos decrecientes a los dos factores reproductivos (k y h).

El segundo hecho, tiene relación con que el p -valor asociado a los dos modelos, no representa una significación estadística suficiente para un 95 % de confianza, lo cual indica que es muy infrecuente obtener una muestra como la actual; por lo tanto las bases de datos consultadas dado su volumen y calidad de información, no permiten conclusiones más robustas y solamente orientan el proceso hacia un nivel de diagnóstico que aunque hace parte de la descripción del horizonte de eventos no alcanza a ser totalmente concluyente.

Sin embargo es posible que mediante la variación de los supuestos realizados, se incluyan más consideraciones, relacionadas a otros tipos de factores que potencialmente puedan limitar el incremento de la productividad, como pueden ser el tamaño y la madurez de las organizaciones para afrontar procesos de mejoramiento continuo.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran la importancia de establecer una medición no paramétrica de la productividad de factores, que permita la aproximación al grado de competitividad del sector industrial del plástico en Bogotá D.C. en términos asociados a la naturaleza del progreso tecnológico del mismo.

Los hallazgos marcan una tendencia del comportamiento del clúster de estudio en relación al uso eficiente de los recursos, donde se identifica una franja muy débil donde fluctúan los índices calculados, que en promedio para los años 2003 al 2009 se encuentra en 0,99 lo que indica que el sector es poco dinámico en su gestión, quizás como consecuencia de su fuerte vínculo con la industria petroquímica, que no lo deja liderar una profundización tecnológica acorde con las expectativas del mercado, que logre una modernización de los procesos de transformación para producir bienes sofisticados.

Las bases de datos consultadas para los cálculos de los factores de producción, particularmente el de fuerza laboral disponible (h), arrojaron resultados que distan de los esperados, ya que no reflejan en su totalidad la incidencia de otros fenómenos que pueden llegar a definir la productividad en el sector de plásticos; por lo tanto es necesario refinar la medición con la incorporación de elementos complementarios que permitan la estimación de una convergencia condicional, donde el crecimiento del clúster este asociado directamente con la inclusión de variables de capital humano, que le hagan tomar distancia de su actual situación de estado estacionario.

Agradecimientos

A la economista y profesora de la Universidad Nacional y Universidad Javeriana, Maria Esperanza Cuenca, por su interés en el tema y orientación frente a los resultados obtenidos de los dos modelos cuantitativos planteados.

Igualmente a los ingenieros investigadores, Jorge Alberto Medina Perilla y Jairo Ernesto Perilla Perilla, de la Universidad de los Andes y de la Universidad Nacional, respectivamente, por la inmersión en los procesos de transformación del plástico.

Al Departamento Nacional de Estadística (DANE), especialmente a la Dirección de Metodología y Producción Estadística y a su director, Eduardo Efraín Freire, por el suministro y ayuda en el manejo de los datos necesarios para esta investigación.

Referencias

1. Toussaint, E.: Un coup d'oeil dans le rétroviseur, Lieja (Bélgica), (2010).
2. Gómez, H.: Revista Malpensante website. [en línea]. Disponible: <http://www.elmalpensante.com> (2011)
3. Dirección de Estudios e Investigaciones: Informe Nacional de Competitividad, Consejo Privado de Competitividad, Bogotá, (2007).
4. Banco Interamericano de Desarrollo y Cámara de Comercio de Bogotá: Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector plástico, Proyecto OPEN, (2008).
5. Califa, C., Peralta, L.: Estudio prospectivo, estratégico y tecnológico del clúster de plásticos en Bogotá, Tesis de Ingeniería, Universidad de América, Bogotá D.C., Abril 2012, S.T. T658. 5C128.
6. Bain, D.: The Productivity Prescription: The Manager's Guide to Improving Productivity and Profits, New York (USA), ed., McGraw-Hill, (1982).
7. Zuniga, C.: Texto básico de economía agrícola: su importancia para el desarrollo local sostenible, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, (2011).
8. Guarín, A.: Cálculo de los factores de concentración del empleo, de prosperidad económica y de dependencia del clúster de plásticos en Bogotá D.C., Revista de Investigación Universidad de América, 1 ed. vol 5, pp.52-66, Enero - Junio (2012).
9. Díaz, A., Sáenz, J.: Productividad total factorial y el crecimiento económico de México. Economía y Desarrollo, Revista Universidad Autónoma de Colombia, 1 ed. vol 1, pp. 105-180, (2002).
10. Alfonso, V., Arango, L., Arias F., Pulido, J.: Ciclos de negocios en Colombia: 1980-2010, en Borradores de Economía (651), Banco de la República, 2011, pp. 1-10. (2011).
11. Fundación de Investigaciones Económicas, Productividad, Competitividad, Empresas: Los engranajes del crecimiento, Ed. FIEL, Buenos Aires, (2002).
12. Mojica, F.: La construcción del futuro, 1ed., Universidad Externado de Colombia - Convenio Andrés Bello, Bogotá, (2005).



Modelado del comportamiento mecánico de unión *socket* – muñón, en amputados de miembro inferior

José Alejandro Guerrero Vargas*, Diego Pataquiva Wilches

Grupo de Investigación de Diseño Avanzado, Fundación Universidad de América.
Bogotá, Colombia

FECHA DE ENTREGA: 30 DE MAYO DE 2014

FECHA DE EVALUACIÓN: 26 DE AGOSTO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 4 DE SEPTIEMBRE

Resumen Se determinó, por medio del método de elementos finitos, el comportamiento de la unión muñón – *socket*, en una amputación trans – tibial; el dominio del problema contempla la piel, el *socket* y el hueso como elementos en contacto. Para ello, se generaron los moldes físicos en un caso específico (paciente), se obtuvieron los modelos geométricos CAD, se realizó el análisis biomecánico en la interfaz, tanto en bipedestación como en marcha, y se llevó a cabo la simulación en ANSYS Workbench. Con base en los resultados obtenidos se establecieron los puntos críticos de presión en comparación con el umbral de dolor. De esta forma, se brinda información para que, al diseñar el *socket*, se busque una mejor distribución de esfuerzos en la interfaz y, con ello, una mejor calidad de vida del paciente.

Abstract It was possible to determine the behavior of the stump/socket junction in a transtibial amputation by using the finite element method. The area of interest includes the skin, the socket, and the bone as elements in contact. Therefore, we generated physical molds for a specific case (patient), resulting in CAD geometric modeling. Also, we performed the biomechanical analysis on the interface —both standing and walking— and carried out the ANSYS Workbench simulation. Based on the results, we were able to establish the critical pressure points compared to the pain threshold. This way, we were able to provide information in order to better distribute the interface efforts and at the same time, generate an improved quality of life to the patient when designing the socket.

Palabras Clave: análisis de elementos finitos, interfaz *socket* – muñón, calidad de vida, umbral de dolor.

Keywords: finite element analysis, stump/socket interface, quality of life, pain threshold.

* Docente investigador, Fundación Universidad de América, Colombia.
jose.guerrero@investigadores.uamerica.edu.co

1. Introducción

De una manera general la biomecánica puede definirse como la rama de la ciencia que se encarga de evaluar las fuerzas, y sus efectos, en sistemas que tienen vida [1]; Sin embargo, cuando recurrimos a un término enfocado en el ser humano, se hace referencia a una ciencia interdisciplinar que estudia el movimiento del cuerpo [2]. Parte de la labor en la que se ocupa la biomecánica está encaminada a tratamientos de rehabilitación sobre pacientes que, por situaciones de violencia o a causa de enfermedad natural, pierden alguna parte de su cuerpo. Como resultado, existen diversos análisis sobre dispositivos protésicos, mecanismos artificiales que reemplazan miembros faltantes y que se espera suplan las funciones que se vieron afectadas por la pérdida [3]; sobre el muñón, o parte del miembro cortado que permanece adherida al cuerpo [3]; y sobre el encaje o *socket*, encargado de realizar la conexión entre el dispositivo protésico y el muñón.

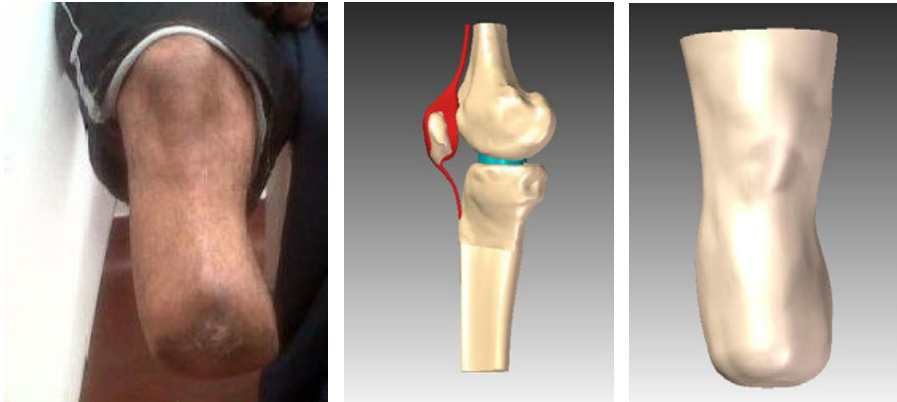
Las amputaciones datan desde la prehistoria y, sobre el 484 A.C., se reporta la primera prótesis que fue empleada por una persona, un dispositivo de madera que suplía parte de la extremidad inferior; luego de esto, diversos aportes históricos han contribuido al desarrollo y evolución de las prótesis a los dispositivos que hoy en día se conocen [4]. En la actualidad existen múltiples estudios en prótesis de miembro inferior, análisis del uso de sensores empleados en estos dispositivos [5], análisis de elementos finitos [6], análisis de umbral de dolor [7], entre otros.

En Colombia, la demanda de prótesis es considerable debido a los factores de violencia, enfermedades naturales, accidentes de tránsito o laborales, entre otros. De acuerdo con el Programa Presidencial para la Acción Integral contra Minas Antipersonal, durante el período de 1990 a Mayo de 2014, se presentaron 10751 víctimas a causa de minas antipersonal (MAP) y municiones sin explotar (MUSE) de los cuales el 80 % resultaron heridos y el 20 % falleció; es decir que, de esta población, existen 8572 personas que potencialmente pueden sufrir amputación [8]. Adicional a esto, según el Ministerio de Protección Social, entre un 7.4 y 9.4 % de la población adulta es diabética, lo que equivale, en cifras del 2011, alrededor de 1.7 millones de colombianos y, sobre este número de individuos, se estima que el 12 % requiere de una amputación; un aproximado de 204000 personas [9]. En conclusión, se puede observar la importancia de este tipo de estudios en Colombia, siendo el mayor causal de esta situación la diabetes.

2. Materiales y métodos

El estudio presentado en este documento se basó en la morfología y características de un paciente masculino de 1.69 m y 66 kg cuya patología corresponde a diabetes. Los modelos geométricos del muñón se generaron a partir de una tomografía computarizada del paciente que después fue reconstruida como se observa en la figura 1.

En el caso del *socket*, el desarrollo del modelo geométrico partió de un molde, o negativo del muñón, el cual es recubierto con una capa de yeso para generar la forma del *socket*. Luego de esto, se realizó un escaneo láser y, de esta forma, se



(a) Muñón paciente caso de estudio. (b) Estructura ósea reconstruida a partir de la tomografía computarizada del paciente. (c) Tejido blando reconstruido a partir de la tomografía computarizada del paciente.

Figura 1.

obtuvo la nube de puntos que permitió la implementación del modelo CAD 3D (Figura 2).



Figura 2. Molde de yeso para el escaneo 3D y modelo CAD 3D del *socket*.

Una vez obtenido el modelo geométrico se procedió al análisis biomecánico. El ser humano, durante su actividad diaria, puede realizar labores como caminar, trotar, subir escalera, marchar, entre otras; sin embargo, cuando una persona ha sufrido algún tipo de amputación, y el paciente es una persona que no desarrolla

actividades como competencia de alto nivel, son de interés en particular dos: la bipedestación y la marcha. La primera corresponde a la capacidad de mantenerse, en los dos pies, erguido [6]. La segunda hace alusión al movimiento de las extremidades inferiores para realizar el desplazamiento. Dicha actividad se realiza de un modo semiautomático fruto de un aprendizaje bien definido [10,11]. La marcha humana se puede subdividir en ciclos que se componen de dos pasos, comienza con el apoyo del talón de un pie en el suelo y termina cuando se vuelve a presentar dicho apoyo con el mismo pie (Figura 3). Cada ciclo se compone de una fase de apoyo y una fase de balanceo [6,10].

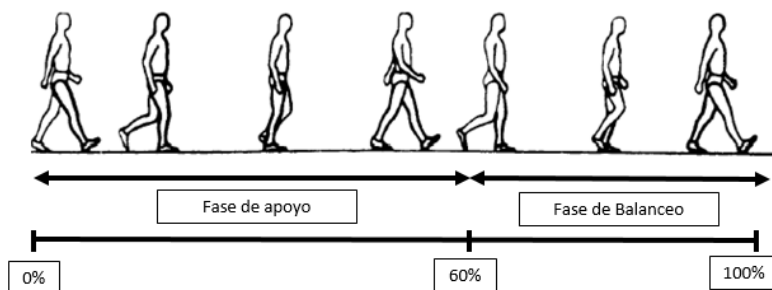


Figura 3. Ciclo de marcha humana. Adaptado de [10].

Para la etapa de bipedestación, el análisis se llevó a cabo con el peso total del paciente dividido en dos. Por su parte, en marcha, el análisis se desarrolló en la fase de apoyo y en la primera etapa de la fase de balanceo; esto debido a que es en estos períodos donde el pie se encuentra en contacto con el suelo y, por ende, es el momento en que mayores esfuerzos percibe la extremidad. La fase de apoyo comprende aproximadamente el 60% del ciclo total y está compuesta de cuatro etapas: contacto inicial (0 – 2%), respuesta a la carga (0 – 10%) y apoyo medio (10 – 30%), contacto final (30 – 50%) [12].

Después de haber definido las etapas dónde se enfocara el estudio, es necesario determinar cuáles son los músculos que interfieren en el análisis. De acuerdo con Javier Daza [13], y adecuando su concepto a la condición de amputación del caso de estudio, los músculos que tienen una influencia significativa en la marcha, ya que son los que generan el avance, corresponden al recto femoral, vasto medial, vasto lateral, vasto intermedio, bíceps femoral (cabeza larga y cabeza corta), semimembranoso y semitendinoso. Con esto, y con la ayuda del *software* OpenSim [14] se procede al cálculo de cargas y momentos totales presentes en cada una de las etapas en la que se genera apoyo durante la marcha.

Por último, se procede a ingresar los modelos geométricos, las cargas, los momentos y las restricciones en el *software* Ansys Workbench donde se llevó a cabo el análisis por elementos finitos (Figura 4).

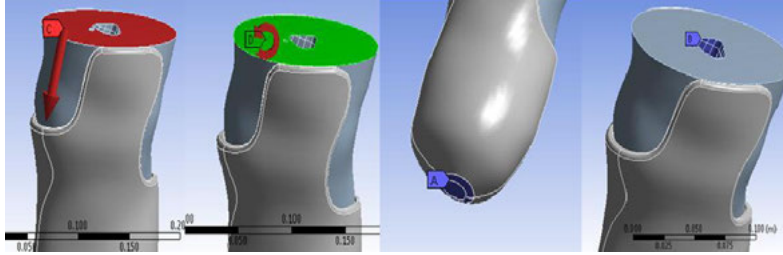


Figura 4. Condiciones de frontera para los análisis estructurales implementados. En rojo fuerzas y momentos aplicados; en azul las restricciones.

En la simulación, los materiales se definieron como lineales, homogéneos e isotrópicos y el análisis correspondió a un análisis estructural estático para las cinco etapas. Las propiedades de material empleadas se obtuvieron de la literatura y corresponden a las establecidas en el cuadro 1.

| Elemento | Módulo de Young (MPa) | Coefficiente de Poisson |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Conjunto óseo [15] | 100000 | 0.3 |
| Menisco [16] | 250 | 0.45 |
| Tendón [17] | 15 | 0.47 |
| Tejido Blando [15] | 0.2 | 0.49 |
| <i>socket</i> [15] | 0.38 | 0.39 |

Cuadro 1. Propiedades mecánicas de los materiales empleados.

3. Análisis de los resultados

De acuerdo con Lee et. al. [15], quien por medio de un indentador, aplicado a pacientes, determinó los esfuerzos máximos que soporta un ser humano en las diferentes regiones del muñón (Figura 5), dichos valores corresponden al umbral del dolor. En este trabajo, fueron empleados como valores límites de esfuerzos en la relación existente entre el muñón y el *socket* para establecer su buen funcionamiento; sin embargo, es inapropiado considerar que superar el umbral de dolor reportado por [15] corresponde a un mal funcionamiento del *socket* ya que el estudio se realizó con cargas puntuales y sin tener en cuenta que las personas difieren en su tolerancia al dolor.

En la figura 6 se observan los esfuerzos resultantes presentes en bipedestación. Se obtuvo un esfuerzo mínimo de 194.53 Pa y un esfuerzo máximo de 113.3 KPa

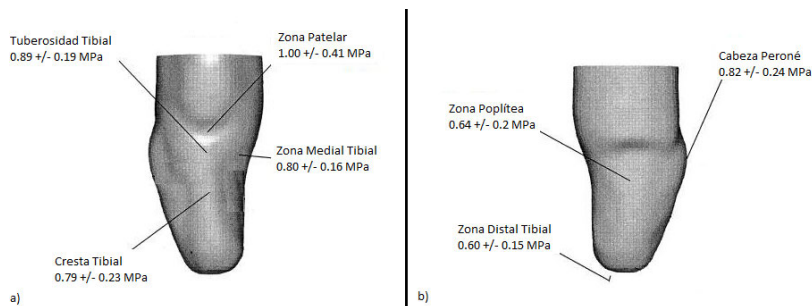


Figura 5. Regiones del muñón. a) Vista anterior. b) Vista posterior. Adaptado de [15].

en la zona distal tibial. En general, se puede apreciar que, durante esta etapa, el comportamiento de la unión muñón – *socket* es adecuado ya que el umbral de dolor no es superado en ninguna de las regiones preestablecidas.

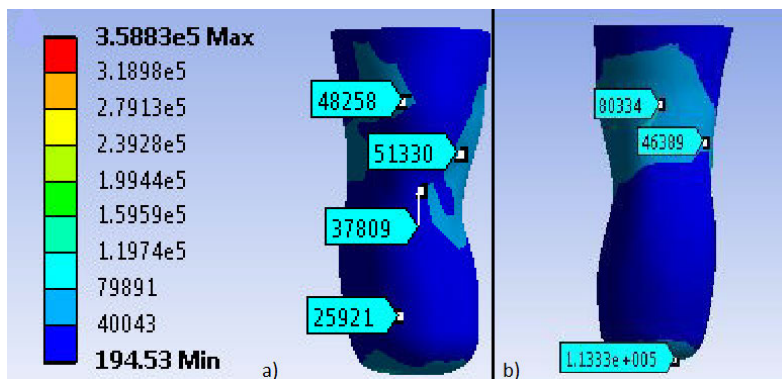


Figura 6. Esfuerzos mecánicos sobre el muñón en bipedestación (MPa). a) Vista anterior. b) Vista posterior.

Por su parte, las figuras 7 a 11 se observan los esfuerzos obtenidos para las diferentes etapas de la fase de apoyo de la marcha humana. Los rangos de esfuerzos sobre el muñón fueron de 495.94 Pa a 1.41 Mpa, de 498.09 Pa a 1.25 Mpa, de 817.1 Pa a 1.29 Mpa, de 797.49 Pa a 1.56 Mpa y de 285.03 a 1.97 Mpa para contacto inicial, respuesta a la carga, apoyo medio, apoyo final y prebalanceo, respectivamente. En todos los casos, el esfuerzo máximo se presentó en el extremo de la zona distal tibial; considerando esta región como un punto crítico para el futuro diseño de *sockets* trans – tibiales. Es de resaltar que los esfuerzos máximos que se visualizan en la regleta de colores corresponden a valores obtenidos en

la región de contacto con el componente óseo pero, bajo los parámetros de este trabajo, no son considerados criterios de buen o mal comportamiento de la unión *socket* – muñón.

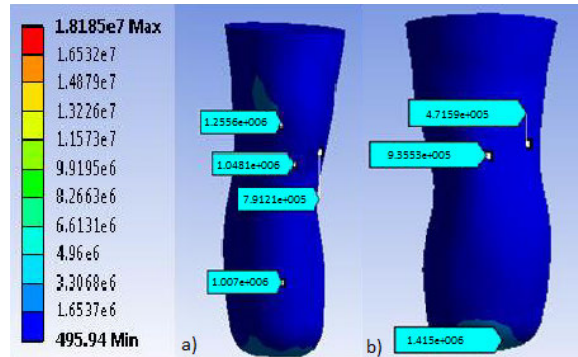


Figura 7. Contacto inicial

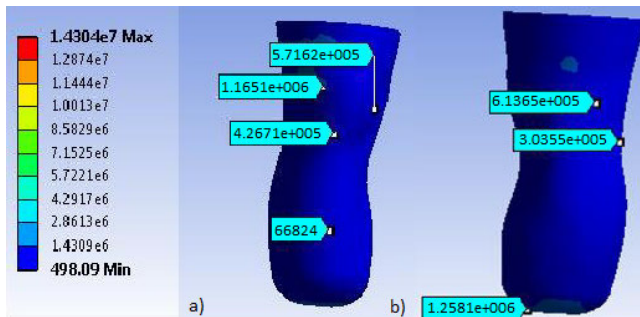


Figura 8. Respuesta a la carga

4. Conclusiones

Como se aprecia en los resultados, existen zonas críticas donde se presentan concentraciones considerables de esfuerzos como lo son la zona patelar y la zona distal tibial; por otra parte, también se observan regiones en las que los esfuerzos no son considerables como las zonas medial, la cabeza del peroné y la cresta tibial. Se puede pensar en dispositivos de encaje protésico que permitan una mejor

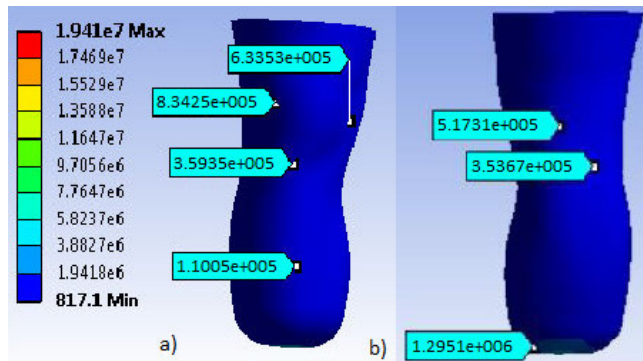


Figura 9. Apoyo medio

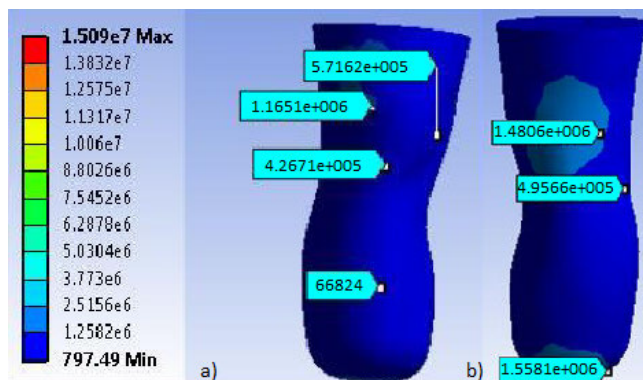


Figura 10. Apoyo final

distribución de esfuerzos y, de esta forma, disminuyan los puntos de concentración, garantizando que en las zonas del muñón los esfuerzos no superen umbrales de dolor.

Referencias

1. McGinnis, P.: Biomechanic of sport and exercise, Champaign, Illinois: Human Kinetics, (2013).
2. Winter, D.: Biomechanics and motor control of human movement, Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc, (2009).
3. Real Academia Española: Diccionario de la lengua española, (2001).
4. Sellegren, K.: An early history of lower limb amputations and prostheses, The Iowa Orthopaedic Journal, vol. 2, pp. 13-27, (1982).

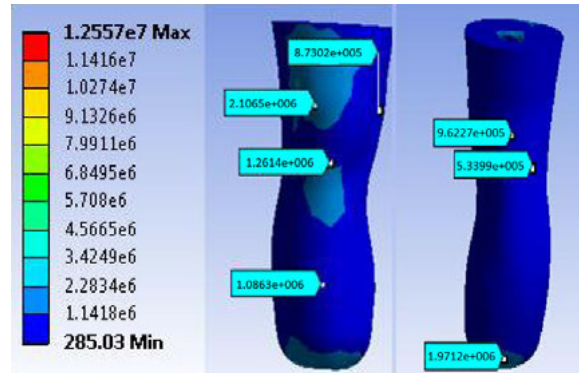
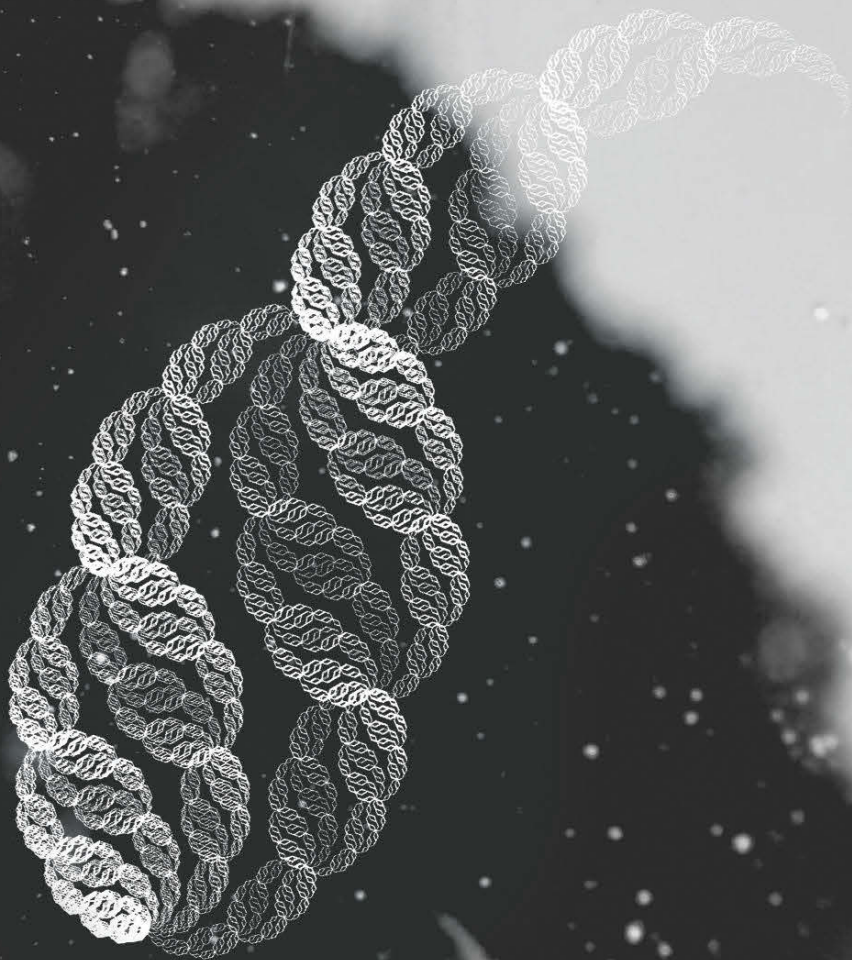


Figura 11. Prebalanceo

5. Oguz Kapti, A., Muhurcu G.: Wearable acceleration sensor application in unilateral trans-tibial amputation prostheses, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 34, pp. 53-62, (2014).
6. Pataquiva, D.: Modelado del comportamiento mecánico de unión *socket* - muñón, en amputados de miembro inferior, Bogotá, D.C.: Fundación Universidad de América, (2013).
7. Ramírez Patiño, J. F.: Nivel de confort y distribución de esfuerzos en la interfaz *socket* - muñón en amputados transfemorales, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, (2011).
8. Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, Programa Presidencial para la Acción Integral contra Minas Antipersonal, 16 Junio 2014. [En línea]. disponible: <http://www.accioncontraminas.gov.co/>.
9. Ministerio de Salud la Protección Social, Presentación 1319 Direcciones [diapositivas de PowerPoint], 2014 Junio 16. [En línea]. disponible: <https://docs.google.com/presentation/d/1ivdT8FnkB70qfqNULK0o1CdQgsywZr5Hm2q89DUqUA0/embed?hl=es&size=m#slide=id.p34>.
10. Wierzeszen, N.: Análisis de la actividad muscular en posición bípeda y durante la marcha, Bilbao: Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea, (2005).
11. Lara M., Angulo M., Llanos M.: Actividad electromiográfica normal en la marcha humana, *Biomecánica*, vol. 7, pp. 110-116, (1996).
12. Perry, J.: Gait analysis: normal and pathological function, *Journal of Pediatric Orthopaedics*, vol. 12, no 6, p. 815, (1992).
13. Daza Lesmes, J.: Evaluación clínico - funcional del movimiento corporal humano, Bogotá: Editorial Médica Internacional, (2007).
14. Stanford University: OpenSim, Stanford University, Palo Alto, (2007).
15. Jia, X., Zhang M., Lee, W.C.C.: Load transfer mechanics between trans-tibial prosthetic socket and residual limb—dynamic effects, *Journal of Biomechanics*, vol. 37, no 9, pp. 1371-1377, (2004).
16. Papaioannou, G., Beillas, P., Anderst, W., Yang K., Tashman, S.: A new method to investigate in vivo knee behavior using a finite element, *Journal of biomechanics.*, vol. 37, no 7, pp. 1019 - 1030, (2004).
17. Wang, J.: Mechanobiology of tendon, *Journal of Biomechanics*, vol. 39, no 9, pp. 1563 - 1582, (2006).



XPS study for CZTS thin films growth by PVD co-evaporation method

Mikel Fernando Hurtado Morales¹²

¹ Departamento de Química. Universidad Nacional de Colombia

² Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar. Universidad Nacional de Colombia

FECHA DE ENTREGA: 20 DE JUNIO DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 2 DE JULIO DE 2013

FECHA DE APROBACIÓN: 29 DE AGOSTO DE 2013

Abstract. This study shows the preparation of different $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films, following the co-evaporation route of metals (Cu, Sn and Zn) in sulfur atmosphere, in three steps sulfide formation. The best results were acquired by Cu/Sn/Zn sequence which has single kesterite phase according to XRD characterization. The surface analyses by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ polycrystalline thin film growth with sequence Cu/Sn/Zn were studied. Binding energies at 161.5 eV, 486.1 eV, 932.4 eV and 1021.6 eV were found for S $2p_{3/2}$, Sn $3d_{5/2}$, Cu $2p_{3/2}$ and Zn $2p_{3/2}$ respectively. SEM and EDS analyses show the morphology and elemental composition of Kesterite CZTS with Sn losses giving a Cu poor and Zn rich structure. The solar cell efficiencies were $\eta = 1.6\%$ for Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO device and $\eta = 1.2\%$ for Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO device, using Cu/Sn/Zn evaporation sequence. These results show the growing use of CZTS kesterite semiconducting material as absorber layer in solar cell devices fabricated by thin film technology.

Resumen. Este estudio muestra la preparación de diferentes películas delgadas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, por medio de la coevaporación de metales (Cu, Sn and Zn) en atmósferas de azufre, y en tres pasos de formación de sulfuro. Los mejores resultados se obtuvieron mediante la secuencia Cu/Sn/Zn, la cual tiene una sola fase kesterita, de acuerdo con la caracterización XRD. Se realizaron análisis de la superficie por medio de una espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) sobre el crecimiento de películas policristalinas delgadas $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, con una secuencia Cu/Sn/Zn. Se encontraron energías de enlace nuclear de 161.5 eV, 486.1 eV, 932.4 eV y 1021.6 eV para S $2p_{3/2}$, Sn $3d_{5/2}$, Cu $2p_{3/2}$ y Zn $2p_{3/2}$, respectivamente. Los análisis SEM y EDS muestran la morfología y la composición elemental de la Kesterita CZTS con pérdidas Sn, resultando en una estructura pobre en Cu y rica en Zn. Las eficiencias de las celdas solares fueron de $\eta = 1.6\%$ para un dispositivo Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO y de $\eta = 1.2\%$ para un dispositivo Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO, usando la secuencia de evaporación Cu/Sn/Zn. Estos resultados demuestran el crecimiento en el uso del material semiconductor kesterita CZTS como una película

absorbente en dispositivos de celdas solares fabricados por medio de una tecnología de películas delgadas.

Keywords: X-ray photoelectron spectroscopy, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, EDS, XRD.

Palabras Clave: espectroscopio de foto-electrones emitidos por rayos X, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, EDS, XRD.

1. Introduction

The family of CIGSSe semiconducting compounds have been the most studied materials for solar cells by thin film technology during last 30 years [1,2]. Despite of this, there is a new scientific and technical way to produce absorber layers without expensive, strategic and heavy metals such In and Ga. Sn and Zn are crust abundant elements and also cheap to isolate and purificate them [3]. Zn^{2+} and Sn^{4+} can replace In or Ga in order to change the chalcopyrit by kesterite phase and maintain the tetragonal unit cell without significant changes on lattice parameters [4].

Several synthesis and growth techniques have been used to produce $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ semiconducting material such as pulsed laser deposition (PLD) [5], colloidal [6], high temperature and HV ampoule [7], electrochemistry [8] spray [9] and chemical wet method [10], but in this work has been used co-evaporation technique by physical vapor deposition. PVD co-evaporation technique allows evaporate the precursor metals in presence of S_2 in order to obtain the quaternary CZTS compound trough sulfide sequential reactions. Efficiency close to 10% was achieved by IBM [11,12], in this work the efficiency were 1.6% for Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO structure and 1.2% for Mo/CZTS/CdS/ZnS/ITO structure, using Cu/Sn/Zn evaporation sequence as absorber layer.

2. Experimental

CZTS Thin films of 600 nm in thickness were prepared by PVD co-evaporation process. The growth process was carried out in three steps in order to obtain in each of them a thermo stable sulfide that can react between them to form $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.

If the process starts with Cu evaporation in presence of S_2 is obtained Cu_2S , in the second step is evaporated Sn to produced the SnS_2 which reacts with Cu_2S to obtain Cu_2SnS_3 , and finally, in the third step is evaporated Zn to form ZnS which reacts with Cu_2SnS_3 to form $\text{Cu}_2\text{SnZnS}_4$, this method avoid secondary phase formation due to ramification reactions, if is used the correct metal amount. However, were prepared the 6 possible sequences (Cu/Sn/Zn), (Cu/Zn/Sn), (Sn/Zn/Cu), (Sn/Cu/Zn), (Zn/Sn/Cu) and (Zn/Cu/Sn) in order to identify secondary phase formation and crystallographic properties (Fig. 1). According to XRD analyses Cu/Sn/Zn sequence is single phase kesterite type structure. This sequence is used for the whole characterization and as absorber layer in the built solar cell device.

In (Fig. 2) is shown the temperature ramp and the evaporation rate in the CZTS growth process. Temperature substrate is one of the most important parameters in the synthesis process, then the temperatures substrate to obtain the above mentioned phases were 600 °C, 250 °C and 600 °C for Cu, Sn and Zn respectively. High vacuum at 1×10^{-5} mbar is required and quartz crystals microbalance is used for determine the metal evaporation rate in each evaporation moment. X-ray diffraction XRD analyses were performed and the sequence Cu/Sn/Zn shows the single phase formation kesterite type tetragonal structure being p-type semiconducting material. Energy dispersive X-ray spectroscopy EDS technique was used to identify the elemental composition of Cu/Sn/Zn sequence sample.

Structural characterization was carried out by *LABX XRD 6000. Shimadzu* equipment with Cu K α radiation between 10° - 70° in 2θ sweep rate 2°/min, step width 0.02° and voltage 40 kV. SEM measures were carried out with a FeiQuanta 200 electron microscope in high vacuum mode using an Everhart-Thorney detector (30 kV) attached with a EDS probe to identify grain size, morphological shape and elemental compositional analysis. The elemental composition analysis of the CZTS thin films was analyzed using an X-ray photoelectron spectrometer (K-Alpha, Thermo VG Scientific, UK) with a multi-channel detector, which can withstand high photonic energies from 0.1 to 3 keV. The whole cells were completed with ZnS [13] and CdS [14] by chemical bath deposition process, ZnO thin film was growth by RF sputtering technique, ITO top contact layer by Magnetron sputtering and Mo back contact with sputtering RF. Characteristic I-V curve was performed by solar simulation equipment in standard conditions AM 1.5, under 100 mW/cm² illumination (measured with a calibrated solar cell) and normal position.

3. Results

The relative atomic concentrations of Zn, Cu, Sn and S were determined from high-resolution XPS core level spectra integrated peak areas. (Fig. 3) shows the Zn L₃M₄₅M₄₅ Auger peak at BE = 496.3 eV (KE = 990.4 eV) can be observed on the high energy side of the Sn 3d core level spectrum.

According to the XPS spectra of Cu₂ZnSnS₄ thin films, the binding energies (BE) of Zn 2p_{3/2} (Fig. 4), Cu 2p_{3/2} (Fig. 5), Sn 3d_{5/2}, and S 2p_{3/2} (Fig. 6), core levels after surface cleaning are located at 1021.6 eV, 932.4 eV, 486.1 eV, and 161.5 eV respectively. These results suggest that samples with Cu/Sn/Zn sequence do not have secondary phase formation.

The EDS analysis (Fig. 7) shows the distribution of constituent elements in the crystals was homogeneous and the bulk composition of the analyzed material was: [Cu] = 23.12; [Zn] = 16.83; [Sn] = 10.95; and [S] = 49.09 mol% giving the following concentration ratios: Cu/(Zn+Sn) = 0.83 and Zn/Sn = 1.53. The kesterite phase of the Cu₂ZnSnS₄ with Cu/Sn/Zn sequence thin film was confirmed by XRD measurements. (Fig. 8) shows the grain size for CZTS Cu/Sn/Zn sequence.

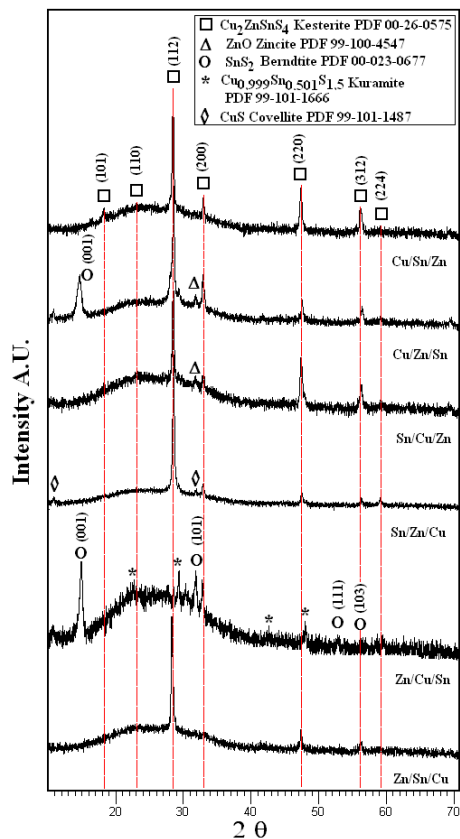


Fig. 1. X-Ray diffraction patterns of typical CZTS thin films deposited varying the sequence (Cu/Zn/Sn, Cu/Sn/Zn, Sn/Cu/Zn, Sn/Zn/Cu, Zn/Cu/Sn, and Zn/Sn/Cu).

(Fig. 9) shows the solar cell using CdS as buffer layer. The efficiency for this solar device was $\eta = 1.2\%$. (Fig. 10) shows the solar cell using ZnS as buffer layer with an efficiency of $\eta = 1.6\%$. The energy losses in the built cells must be due to the low thickness of CZTS absorber layer and passivation due to MoS₂ formation. These results suggest that the Cu/Zn/Sn evaporation sequence starting from metal precursors in S₂ atmosphere leads a single kesterite phase which has adequate structural, morphological and chemical properties to be used as absorber layer in solar cell devices by thin film technology.

4. Conclusions

EDS analysis show atomic composition S: 49.09%, Cu: 23.12%, Zn: 16.83% and Sn: 10.95%. The absence of the Auger peak Sn M₄N₄₅N₄₅ of CZTS thin films

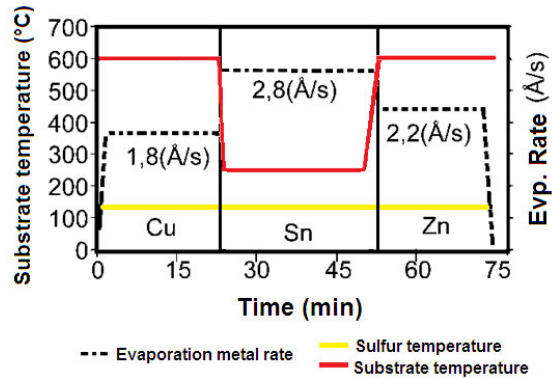


Fig. 2. Substrate temperature ramp and evaporation metal rate in a co-evaporation process with sequence Cu/Sn/Zn. Sulfur temperature is keeping constant at 140 °C during all process.

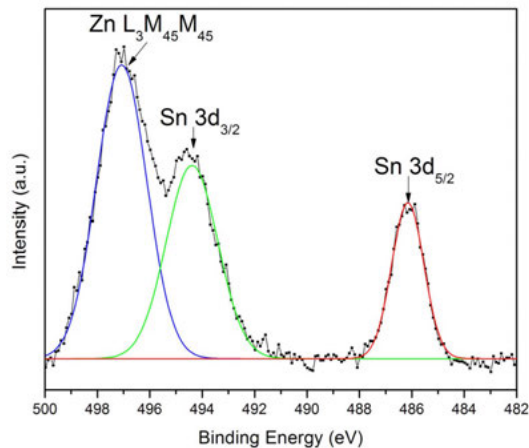


Fig. 3. High-resolution XPS spectra of the Sn 3d core level and Auger peak the Zn $L_3M_{45}M_{45}$ of CZTS thin film.

suggests non Sn_xS_y phase on the top of the surface, this results is according to the EDS tin analysis, it leads to a tetragonal kesterite structure Cu-rich and Zn-poor. The absence of chemical shifts in the found XPS signals core levels, suggest no satellite signals. Characterization performed by XRD gave evidence of the formation of single phase CZTS films with Kesterite structure using optimized growth parameters; however the chosen sequence in which the metallic precursors

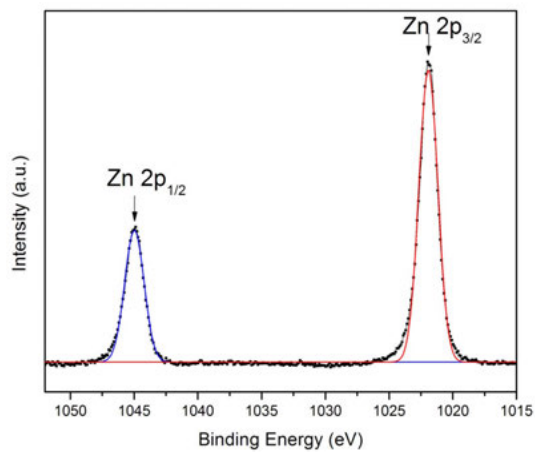


Fig. 4. High-resolution XPS spectra of the Zn 2p core level of CZTS thin film.

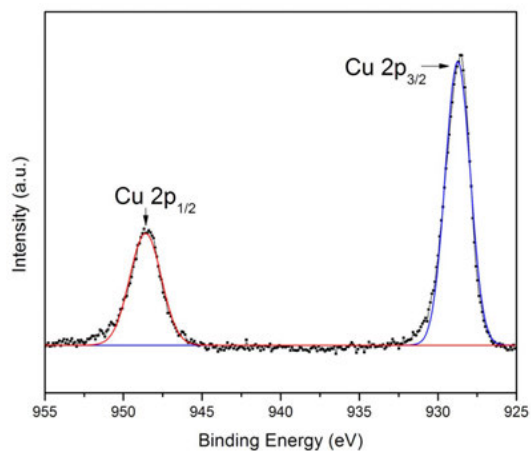


Fig. 5. High-resolution XPS spectra of the Cu 2p core level of CZTS thin film.

are evaporated, significantly affects the phase, morphology, as well as, structural properties of the CZTS films. The poor crystallographic qualities of CZTS thin films are probably associated to structural and native defects.

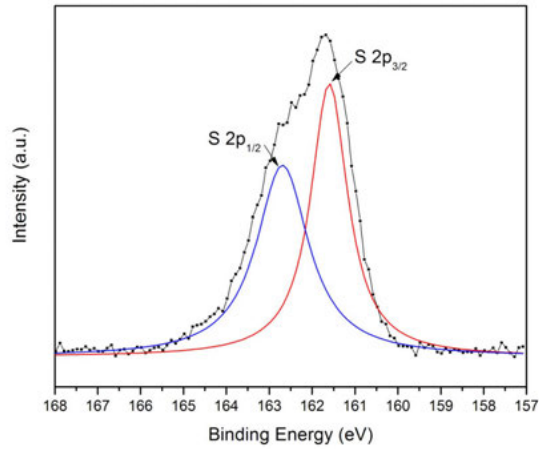


Fig. 6. High-resolution XPS spectra of the S 2p core level of CZTS thin film.

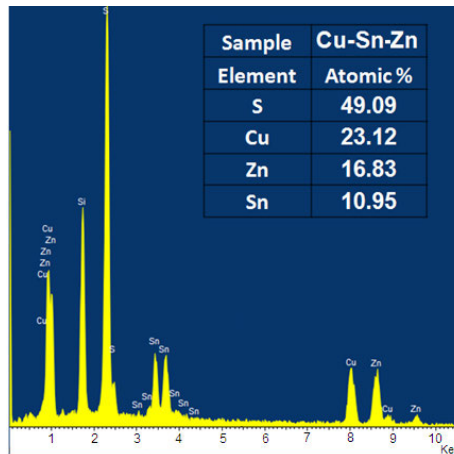


Fig. 7. EDS analysis for co-evaporation sequence Cu/Sn/Zn.

Solar cell efficiency was $\eta = 1.6\%$ for SLG/Mo/CZTS/CdS/ZnO/ITO device and $\eta = 1.2\%$ for SLG/Mo/CZTS/ZnS/ZnO/ITO, those results suggest that ZnS can be replaced CdS as buffer layer in low cost solar cell devices.

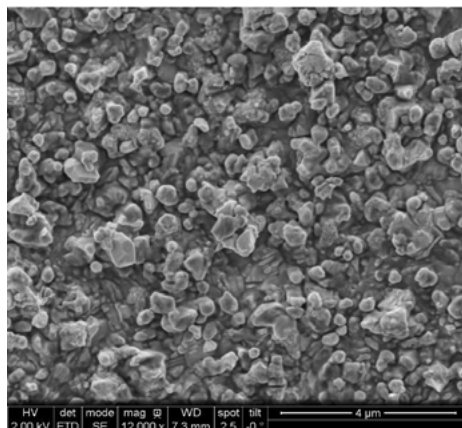


Fig. 8. SEM image for CZTS with sequence co-evaporation Cu/Sn/Zn.

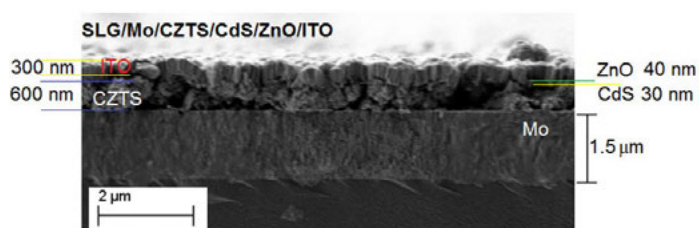


Fig. 9. Cross section of SLG/Mo/CZTS/CdS/ZnO/ITO solar cell device.

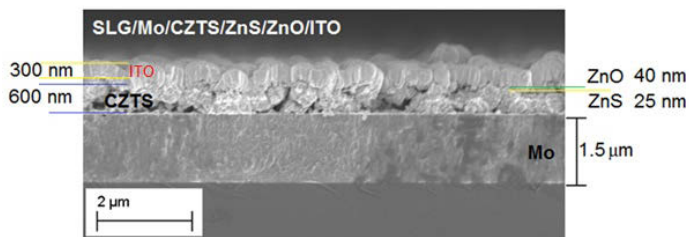


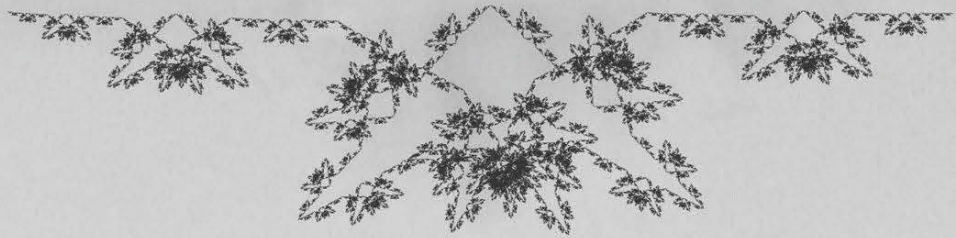
Fig. 10. Cross section image of SLG/Mo/CZTS/ZnS/ZnO/ITO solar cell device.

Acknowledgment

To Semiconducting Materials and Solar Energy group, Chemistry Department Universidad Nacional de Colombia, Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, and Catalonia Institute for Energy Research IREC.

References

1. Allsop, N. A., C. Camus.: Indium sulfide buffer/CIGSSe interface engineering: Improved cell performance by the addition of zinc sulfide. *Thin Solid Films*. 515 (2007) 6068-6072.
2. Karg, F.: High Efficiency CIGS Solar Modules. *Energy Procedia*. 15 (2012) 275-282.
3. Inamdar, A. I., S. Lee.: Optimized fabrication of sputter deposited $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin films. *Solar Energy*. 91 (2013) 196-203.
4. Shin, S. W., S. M. Pawar.: Studies on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) absorber layer using different stacking orders in precursor thin films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (2011) 3202-3206.
5. Moholkar, A. V., S. S. Shinde.: Studies of compositional dependent CZTS thin film solar cells by pulsed laser deposition technique: An attempt to improve the efficiency. *Journal of Alloys and Compounds*. 544 (2012) 145-151.
6. Akhavan, V. A., B. W. Goodfellow.: Colloidal CIGS and CZTS nanocrystals: A precursor route to printed photovoltaics. *Journal of Solid State Chemistry*. 189 (2012) 2-12.
7. Kheraj, V., K. K. Patel.: Synthesis and characterisation of Copper Zinc Tin Sulphide (CZTS) compound for absorber material in solar-cells. *Journal of Crystal Growth*. 362 (2013)174-177.
8. Pawar, S. M., B. S. Pawar.: Single step electrosynthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin films for solar cell application. *Electrochimica Acta*. 55 (2010) 4057-4061.
9. Shinde, N. M., R. J. Deokate.: Properties of spray deposited $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin films. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 100 (2013) 12-16.
10. Shinde, N. M., C. D. Lokhande.: Low cost and large area novel chemical synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 235 (2012) 14-20.
11. Mitzi, D. B., O. Gunawan, et al.: The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95 (2011) 1421-1436.
12. Todorov, T., O. Gunawan.: Progress towards marketable earth-abundant chalcogenide solar cells. *Thin Solid Films*. 519 (2011) 7378-7381.
13. W. Vallejo, M. Hurtado, G. Gordillo.: Kinetic study on $\text{Zn}(\text{O},\text{OH})\text{S}$ thin films deposited by chemical bath deposition. *Electrochimica Acta*. 55 (2010) 5610-5616.
14. D. Abou-Ras, G. Kostorz, A. Romeo.: Structural and chemical investigations of CBD- and PVD-CdS buffer layers and interfaces in $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ based thin film solar cells. *Thin Solid Films*. 480-481 (2005) 118-123.



Grado de cumplimiento y conocimiento de la resolución 371 de 2009, referente al manejo de medicamentos vencidos en la ciudad de Bogotá, Colombia

Laura Ximena Lobo Berbesí*, Diana Catalina Reina Galindo**, Luis David Gómez Méndez***

Universidad Javeriana. Bogotá - Colombia

FECHA DE ENTREGA: 9 DE MAYO DE 2014

FECHA DE EVALUACIÓN: 26 DE MAYO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 26 DE MAYO DE 2014

Resumen El presente trabajo tuvo por objeto establecer, mediante observación directa, encuestas (a consumidores, comercializadores y productores de medicamentos) y análisis de datos, el porcentaje de cumplimiento y conocimiento de la Resolución 371 de 2009, por la cual se establece la gestión y disposición final de los medicamentos vencidos, en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Dada la naturaleza exploratoria del trabajo, se realizó un sondeo respecto al grado de conocimiento y cumplimiento de dicha resolución, el cual arrojó los siguientes resultados: el 14 % de la población de consumidores conoce y usa los “puntos azules”. El 7 % de los comercializadores o distribuidores se preocupa por informar voz a voz el mecanismo para la devolución de medicamentos vencidos. Y el 100 % de los productores o importadores de los medicamentos entrevistados tienen un plan de información a los usuarios sobre la gestión de medicamentos vencidos, solo se entrevistaron a dos empresas productoras o importadoras de medicamentos, del “*n*-muestral” planteado. Estos resultados muestran un porcentaje inferior al 20 % de cubrimiento de la población, en cuanto a divulgación del plan de gestión de devolución de medicamentos vencidos en la ciudad de Bogotá, como lo exige la norma.

Abstract This paper aimed to establish —through direct observation, surveys (to consumers, distributors, and producers of medications) and data analysis— the compliance and knowledge percentage of the Resolution 371 of 2009, through which the management and disposal of expired medications in the city of Bogotá, Colombia is established.

Due to the exploratory nature of the paper, we carried out a survey regarding the degree of compliance and knowledge of such resolution. This survey showed the following results: 14 % of consumers knows and

* Microbióloga Industrial. lauralobob@gmail.com

** Microbióloga Industrial. dcatar90@hotmail.com

*** Magister en Microbiología. luis.gomez@javeriana.edu.co

uses the “blue points”. 7 % of distributors concerns about informing by word of mouth the procedure used to return expired medications. 100 % of producers or importers have a plan to inform users about the handling of expired medications. Only two companies out of the suggested “*n*-sampling” that produce and import medications were interviewed. These results display a percentage below 20 % of population coverage regarding the awareness of the expired medication return management plan in the city of Bogotá, as the regulation establishes.

Palabras Clave: medicamentos vencidos, puntos azules, residuos pos consumo.

Keywords: expired medications, blue points, post-consumption waste.

1. Introducción

En el contexto mundial, la industria farmacéutica es considerada como uno de los sectores de mayor relevancia, pues no sólo promueve el desarrollo tecnológico y científico con la permanente implementación de procesos industriales innovadores y la consecuente formulación y producción de medicamentos que responden a gran la diversidad de necesidades de los consumidores; sino que desde el punto de vista económico la participación de 25 sus compañías multinacionales representa el 50 % del mercado mundial, que en 2004 generó ventas de 550.000 millones de dólares [16].

Por otra parte, desde una perspectiva ecológica, la cadena de producción de esta industria, genera diversos tipos de residuos que normalmente reportan una baja Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y un pH cercano a la neutralidad [6]. Cuando estos residuos son sometidos a un proceso de tratamiento previo a su vertimiento a los cuerpos de agua, no representan un riesgo significativo para el medio ambiente ni la salud pública. Sin embargo, el aumento de la producción y consumo de medicamentos es directamente proporcional a su persistencia en los efluentes de las plantas de tratamiento. Estos resultados han despertado el interés por determinar los posibles impactos de dichos residuos en los ecosistemas, especialmente en los peces y mamíferos marinos [2,3,4,7,11,15,17].

En el caso particular de Colombia, la contaminación del medio ambiente por la presencia de medicamentos se conjuga con su inadecuada disposición final en el servicio público domiciliario de aseo que, por ser conglomerados a cielo abierto en un relleno sanitario, con otro tipo de residuos tales como: materia orgánica, plásticos, vidrio, pilas, baterías, entre otros, favorece su transformación en compuestos recalcitrantes, de difícil degradación natural y, por ende, persistentes en la naturaleza. Por esta razón, dichos compuestos son considerados como residuos peligrosos o RESPEL y deben ser incluidos en un sistema de disposición final, como lo sugiere la Política Ambiental Nacional [13].

Dicha Política Ambiental Nacional surge como herramienta ante la necesidad de sistematizar la información relacionada con el origen, cantidad, calidad, manejo y gestión de los residuos peligrosos, pues, hasta el momento sólo existían estudios

aislados y sectorizados que no reflejaban la situación actual de dichos residuos [5,11].

Lo anterior, sumado a la falta de planeación de su disposición final, normatividad dispersa en la que se plantea un manejo orientado a las acciones correctivas y no a la implementación de procesos industriales más limpios, desconocimiento de los impactos negativos por parte de los generadores y receptores, ausencia de reglamentos técnicos que faciliten su clasificación, identificación y caracterización, así como una oferta limitada de laboratorios especializados en el tratamiento de dichos residuos, estimulan la creación de dicha Política Ambiental Nacional, la cual tiene por alcance la gestión de residuos sólidos, semisólidos, líquidos y gases contenidos para su manejo y gestión en las diferentes etapas de manejo como: generación, transporte, comercialización y distribución, consumo, almacenamiento, aprovechamiento, tratamiento, disposición final, importación y exportación [13].

En respuesta al cumplimiento de dicha Política, en el 2009 se promulgó la Resolución 371, por medio de la cual se “establecen los elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Fármacos o Medicamentos Vencidos” [11].

Con el fin de asegurar la recolección de los medicamentos vencidos, dicha Resolución plantea que en el primer año a partir de su publicación, se implemente un plan piloto de recolección en el cual se incluyan actividades de sensibilización al consumidor y a los actores de la cadena. A partir del tercer año debe presentar anualmente aumentos del 10 % de cubrimiento de la población, hasta lograr un 70 % de cubrimiento en el país.

El objetivo del presente trabajo fue establecer mediante observación directa, encuestas y análisis de datos, el porcentaje de cumplimiento de la Resolución 371 de 2009, por la cual se establece la gestión y disposición final de los medicamentos vencidos, en la ciudad de Bogotá.

2. Materiales y métodos

2.1. Determinación del tamaño de la muestra poblacional

En un primer momento se determinó el tamaño de las muestras de los tres tipos de poblaciones a encuestar: personas del común o consumidores, comercializadores o distribuidores y productores o importadores de los medicamentos, aplicando la siguiente fórmula para cada caso:

$$n = \frac{Z^2(p)(q)}{ep^2 + Z^2 \frac{(p)(q)}{N}} \quad (1)$$

En donde:

- Z = Valor de z , valor de confianza dado por la tabla de distribución normal.
- ep = Error proporcional, describe qué tan reproducibles son las mediciones.
- p = proporción, de cumplimiento de dicha medición.
- q = proporción, de que no se cumpla dicha proporción.

- N = Tamaño de la población

En cada población muestral, se trabajó con un valor de confianza de un 95 % y un error proporcional del 5 %. Para la realización de las encuestas se aplicó un muestreo aleatorio estratificado, debido a que el tamaño de cada muestra era variable. En el caso de los consumidores finales, se seleccionaron personas mayores de edad o jefes de hogar, que se encontraran en el perímetro de los “puntos azules”, dispositivos usados para la disposición temporal de los medicamentos vencidos, ubicados en las farmacias de supermercados de grandes superficies o de barrios.

Con el fin de determinar la población a encuestar, se utilizó la base de datos del Departamento Nacional de Estadística (DANE), en donde se obtuvo que para el 15 de julio de 2010, la población de Bogotá que cumplía con las características mencionadas era de 1'700.000 habitantes. Al aplicar la fórmula se obtuvo un “ n -muestral” de 283 personas.

Para el caso de los fabricantes de medicamentos, se seleccionaron de manera aleatoria aquellas empresas que se autorizaron por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos –INVIMA– al 15 de Julio de 2010. Se escogieron aquellos fabricantes ubicados en la ciudad de Bogotá. Se obtuvo un “ n -muestral” de 20 fabricantes y/o importadores.

En el caso de los distribuidores y /o comercializadores se seleccionaron de manera aleatoria aquellas droguerías que tuvieran un “punto azul” registrado por la Asociación Nacional de Industrias –ANDI– al 15 de julio de 2010. El “ N -poblacional” era de 155, después de realizada la formula se obtuvo un “ n -muestral” equivalente a 40.

2.2. Planteamiento de las encuestas para cada población

En el caso de los tres segmentos de las poblaciones encuestadas, se tomaron como punto de referencia las directrices estipuladas por la Resolución 371 de 2009. Para las encuestas dirigidas a los fabricantes y/o generadores de medicamentos, se tuvieron en cuenta las disposiciones establecidas por los artículos 10 y 21 del Decreto 4741 de 2005, relacionadas con su obligación de garantizar la gestión y manejo integral de dichos residuos mediante un plan documentado que prevenga la generación y reducción en la fuente, además de minimizar la cantidad y peligrosidad de los mismos. (Decreto 4741 de 2005)

Así mismo, se formularon las preguntas en función del artículo 8 del Decreto 2676 de 2000, y de la Resolución 1164 de 2002, referentes a las obligaciones del generador de residuos hospitalarios y similares, que incluyen los medicamentos y/o fármacos vencidos, parcialmente consumidos, deteriorados, alterados y/o excedentes (Decreto 2676 de 2000 Resolución 1164 de 2002).

3. Resultados y discusión

Con el fin de llevar a cabo las encuestas a la población de consumidores y distribuidores y/o comercializadores de medicamentos de la ciudad de Bogotá,

se seleccionaron las localidades de Usaquén, Chapinero, Kennedy y Usme, que fueron las cuatro zonas en las cuales se implementaron y desarrollaron los planes piloto en 2009.

3.1. Datos obtenidos de la encuesta realizada a consumidores

La encuesta realizada para los consumidores tenía como objetivo evidenciar el grado de conocimiento y uso de los “puntos azules”, información que se convierte en un indicativo directo de la efectividad de la implementación de los mecanismos de comunicación a los consumidores acerca de los planes piloto de la gestión de devolución de fármacos y/o medicamentos vencidos por parte de los fabricantes y/o productores y los comercializadores y/o distribuidores, con el objetivo de lograr la cobertura anual porcentual, incluyendo medidas preventivas de riesgos en la salud y el medio ambiente como lo establece la Resolución 371 de 2009 [11].

Dentro de los resultados obtenidos, se encontró que un 60 % de las personas del común preferían desechar los medicamentos vencidos o sus residuos en la basura; un 26 % en el drenaje, y sólo un 14 % de esta población utilizaba los puntos azules (Figura 1). Lo anterior, permite inferir que posiblemente los mecanismos adoptados para la divulgación al consumidor, acerca de los “puntos azules”, no son adecuados para alcanzar la cobertura de información a la población del 20 % en la ciudad de Bogotá, como lo sugiere dicha norma al tercer año de su publicación, ya que la población continúa descartando de manera inadecuada los medicamentos.

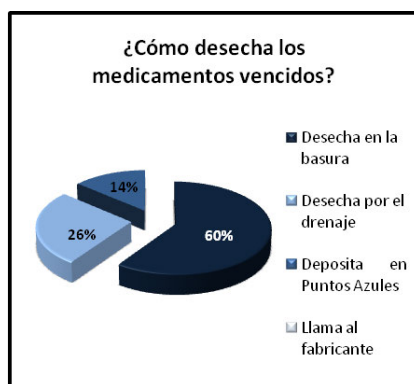


Figura 1. Forma más común adoptada por la población para desechar los medicamentos vencidos.

Sin embargo, los datos obtenidos contrastan con el reporte realizado por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia –ANDI–, el cual indica que en los años 2010 y 2011 se recolectaron 21.8 toneladas de medicamentos vencidos a través de la instalación de 311 contenedores, logrando una cobertura del 10.22 %

en la población, superando la meta planteada en la Resolución 371 de 2009, equivalente al 10 % para el primer año de implementación y un 20.5 % para el segundo año [8].

Cabe resaltar que la presente encuesta se realizó en el año 2011, por lo que probablemente los datos obtenidos reflejan la incipiente campaña de sensibilización a la población. La anterior inferencia se confirma con la respuesta equivalente al 15 % de la población que afirmó conocer los “puntos azules” (Figura 2) y su ubicación en farmacias y supermercados de grandes superficies. En contraste un 85 % manifestó no poseer información al respecto, lo que refleja desinformación de gran parte de la población acerca de la importancia de recolectar este tipo de medicamentos en los lugares establecidos por las entidades responsables. Igualmente se encontró que del 15 % de la población que afirmaba conocer los puntos azules, por lo menos el 7 % nunca los utilizaba argumentando que no estaban ubicados cerca a su domicilio.



Figura 2. Porcentaje de conocimiento respecto a su uso por parte de los consumidores.

Igualmente, estos resultados demuestran la falta de compromiso que cada individuo tiene con el medio ambiente y la salud de la población, así como las posibles fallas en la divulgación del tema, ya que la mayoría de los encuestados consideraban que los medicamentos vencidos no generan un impacto negativo sobre el ambiente, pues asumen que éstos sufren un proceso de dilución y autodepuración natural. Se sabe, sin embargo, que a bajas concentraciones, los remanentes de dichos productos pueden generar impactos de fertilidad, mortandad y mutaciones en los organismos que conforman los ecosistemas acuáticos y por ende en la cadena trófica, por bioacumulación [14].

Las preguntas 3 y 4 referentes a la información que posee la población sobre la función de los centros de acopio de medicamentos vencidos y su ubicación, son de carácter complementario pues permiten determinar la veracidad de las respuestas anteriores y establecer que sólo el 19 % de la población encuestada sabe qué es y para qué sirve un centro de acopio temporal de medicamentos y/o fármacos vencidos (Figura 3), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en

cuanto al conocimiento de la ubicación de los “puntos azules”. Esto indica que sólo el 35 % de la población encuestada, sabe que estos centros se encuentran principalmente en supermercados de grandes superficies y en algunas cadenas de farmacia; sin embargo esto no significa que la población muestreada use los “puntos azules” (Figura 4).

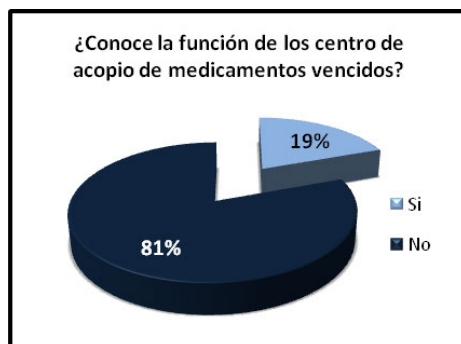


Figura 3. Grado de conocimiento de la función de los centros de acopio de medicamentos vencidos.

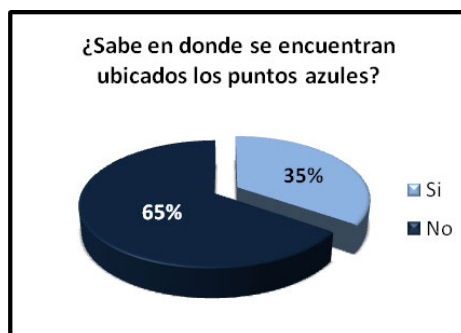


Figura 4. Conocimiento que tienen los consumidores sobre la ubicación de los “puntos azules”.

Con respecto a las preguntas 5 y 6 referentes a los marcos legales vigentes que rigen la gestión de los medicamentos y/o fármacos vencidos, así como la información sobre la existencia del ente regulador de la gestión de dichos residuos peligrosos, se observa un desconocimiento del 89 % y el 72 % respectivamente, lo que indica que los esfuerzos realizados por el Ministerio del Medio Ambiente para

dar a conocer la Resolución 371 de 2009, como un marco legal que involucra de manera conjunta a los actores implicados en el ciclo de producción, distribución y consumo de los medicamentos, no han sido lo suficientemente eficientes para lograr el funcionamiento integral de los planes de gestión para la devolución de dichos residuos peligrosos (Figuras 5 y 6).



Figura 5. Conocimiento porcentual que tienen los consumidores sobre alguna normatividad referente a la gestión de medicamentos vencidos.



Figura 6. Conocimiento acerca del ente vigilante de la gestión de medicamentos vencidos.

3.2. Datos obtenidos a partir de la encuesta realizada a los distribuidores y/o comercializadores que contaban con un “punto azul” en su farmacia

De acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta realizada a los distribuidores y/o comercializadores de medicamentos, se evidencia un desconocimiento generalizado (63 %) de la normatividad concerniente a la gestión de medicamentos vencidos (Figura 7), en donde el personal de la farmacia a pesar de tener conocimientos técnicos en auxiliar farmacéutico, tal como lo determina el artículo 18 del Decreto 1950 de 1964, no conoce la Resolución 371 de 2009 ni la importancia de su riguroso cumplimiento.

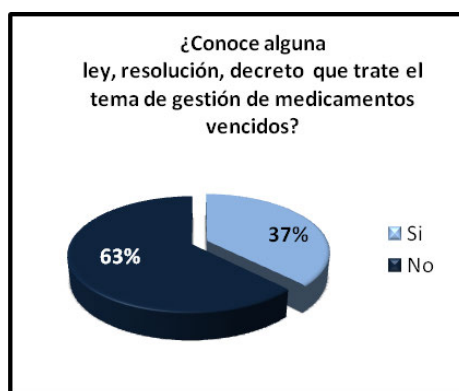


Figura 7. Porcentaje de conocimiento y desconocimiento por parte de los distribuidores y/o comercializadores respecto al marco legal concerniente al tema de gestión de medicamentos vencidos.

Lo anterior se presentó en conjunto con la percepción acerca de la no peligrosidad de los medicamentos vencidos para el medio ambiente y la salud pública, con el argumento de que dichos productos no se clasifican bajo la denominación de “RESPEL” dado que no son reactivos, explosivos o infecciosos (Figura 8). Esto significa que se desconocen no sólo la resolución evaluada en el presente trabajo, sino el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 que reglamenta (...) “parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral (...)”. (Colombia, Decreto 4741 de 2005)

A pesar de que el 60 % del personal a cargo de las farmacias encuestadas recibe cursos periódicos de capacitación, tal como lo contempla el Decreto 4741 de 2005 (Figura 10), se encuentra muy poco interés por establecer sistemas de comunicación y divulgación a los consumidores, acerca de los riesgos y consecuencias que tienen los medicamentos vencidos sobre el medio ambiente y la salud pública, pues únicamente el 7 % de las farmacias encuestadas se preocupan por



Figura 8. Porcentaje de distribuidores y/o comercializadores encuestados que cuentan con sistemas de comunicación al usuario y/o consumidor, respecto al impacto que tienen sobre el medio ambiente los fármacos y medicamentos vencidos y los riesgos que éstos representan para la salud de la población.

dar información voz a voz a sus clientes, sobre el impacto ambiental generado al desechar en la basura o en el alcantarillado, los medicamentos que han dejado de usar, indicándoles que la correcta disposición de los medicamentos vencidos se realiza en los “puntos azules” ubicados en las farmacias (Figura 9).

Se evidencia así, el incumplimiento de las obligaciones establecidas en la Resolución 371 de 2009, por parte de los distribuidores y/o comercializadores en relación con la adopción de sistemas de divulgación o información a los consumidores para promover el uso de los puntos azules. Esto también se relaciona con la falta de conocimiento por parte de los consumidores acerca de la existencia de estos centros de acopio temporales de los medicamentos vencidos. Es significativo además, que para la mayoría de las farmacias encuestadas la existencia de los “puntos azules” se considera como un requisito legal más, que deben cumplir.

3.3. Datos obtenidos a partir de la encuesta realizada a los fabricantes y/o importadores de medicamentos de uso humano de la ciudad de Bogotá

La encuesta estuvo enfocada a la indagación de la presencia e implementación de planes de gestión de disposición final de los medicamentos vencidos, el cual incluía sistemas de monitoreo periódico (mensual) al ambiente, respecto a los impactos generados por los residuos obtenidos del proceso de producción; información al consumidor respecto a la importancia y los riesgos a la salud y al ambiente que puede generar la inadecuada disposición final de los medicamentos vencidos. (Resolución 1164 de 2002)

Sin embargo, los datos obtenidos en las encuestas realizadas a los productores y/o fabricantes de medicamentos de la ciudad de Bogotá, no representan el



Figura 9. Porcentaje de distribuidores y/o comercializadores encuestados que cuentan con sistemas de comunicación al usuario y/o consumidor, diferentes al volante proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente, respecto a la importancia de la devolución de los medicamentos vencidos en los “puntos azules”.

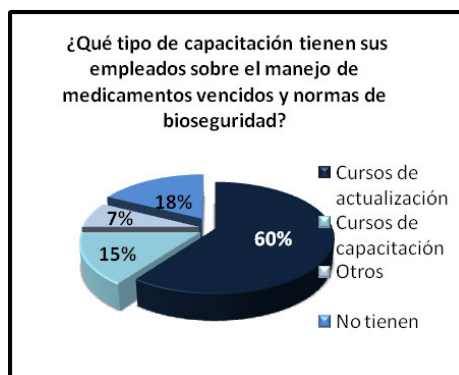


Figura 10. Porcentaje del tipo de capacitación y/o conocimiento del personal de los puntos de distribución y/o comercialización de medicamentos, con respecto al manejo de medicamentos y/o fármacos y normas de bioseguridad.

comportamiento generalizado de la población mencionada, dado que la mayoría de industrias farmacéuticas se mostraron escépticas ante la aplicación de las encuestas, por lo que sólo se entrevistaron a dos productores de medicamentos.

A pesar que los productores o fabricantes de medicamentos encuestados, afirmaron tener posesión e implementación de un plan de información a los usuarios y/o consumidores referente a la devolución de los medicamentos vencidos o remanentes que no sean utilizados en su totalidad, la encuesta realizada a los consumidores, demuestra el desconocimiento que tienen respecto a esta

posibilidad, ya que el 100 % de las respuestas obtenidas evidenciaron la falta de contundencia de las campañas de información, divulgación y/o comunicación hacia los consumidores, lo cual refleja nuevamente una desarticulación entre la Resolución 371 de 2009 y la situación real en la que se desempeña cada uno de los actores encuestados.

Las estadísticas oficiales indican que para el 2011 la generación de residuos peligrosos fue de 174.418,7 toneladas, cifra superior a las 141.735,0 toneladas generadas en 2010, e inferior al año 2009, lo cual indica que el amplio marco normativo no ha logrado disminuir significativamente la producción de RESPEL a nivel nacional [8].

Lo anterior, guarda una proporción con el crecimiento económico de un 5,9 % para el 2011 y con la distribución de las categorías de generadores de RESPEL determinado por el Decreto 4741 de 2005, en donde los grandes generadores han aportado un promedio del 92,5 % de la generación total anual, los medianos el 6,3 %, los pequeños el 1,1 % y los no obligados el 0,1 % [8].

Según las cifras oficiales, las industrias farmacéuticas presentan la menor participación en la producción de residuos peligrosos, sin embargo, no dejan de ser de interés dado los impactos que generan en la salud humana y su persistencia en el medio ambiente, como es el caso de las 150,3 toneladas anuales de mercurio y sus compuestos producidas, sólo 11,5 son aprovechadas, 38,6 son tratadas y las 81,9 Toneladas restantes sufren el proceso de incineración (disposición final). De acuerdo a las cifras del Perfil Nacional de Sustancias Químicas en Colombia, para el año 2010 se produjeron 1.541,4 Toneladas de desechos y productos farmacéuticos, de los cuales sólo 389,1 Toneladas fueron aprovechadas, 1.294,5 Toneladas fueron tratadas y 121,6 tuvieron una disposición final [14].

4. Conclusiones

Se estableció que sólo el 14 % de la población encuestada de las localidades de Chapinero, Kennedy, Usaquén y Usme conocen y usan los “puntos azules”, lo cual no cumple con el porcentaje gradual establecido por la Resolución 371 de 2009, equivalente al 20 % para el tercer año, después de la publicación de dicha normatividad. Es importante resaltar que en el presente estudio no fue posible determinar la localidad que poseía el mayor número de “puntos azules”, debido a que se utilizó un muestreo aleatorio estratificado, en donde la selección del tamaño de la muestra se estipuló en función del carácter finito, contable y la heterogeneidad de la población de farmacias con “puntos azules” en la ciudad de Bogotá.

Así mismo, no se determinó una reciprocidad entre la cantidad de “puntos azules” por localidad y el mayor o menor grado de conocimiento de la Resolución 371 del 2009, por parte de los consumidores, ya que el diseño de la encuesta no estaba enfocado a determinar que la población encuestada viviera en la misma localidad del “punto azul” encuestado, pues de acuerdo con dicha normatividad, independientemente de la localidad en la que habiten los consumidores finales, se

debe realizar un cubrimiento de información a la población de Bogotá equivalente al 20 % para el presente año (2012).

Se logró evidenciar que la muestra poblacional de los fabricantes no cumple con la gestión de medicamentos vencidos y planes de divulgación hacia los consumidores como lo establece la Resolución 371 de 2009. Sin embargo, cabe resaltar que los datos obtenidos de los fabricantes y/o productores de medicamentos de la ciudad de Bogotá no son representativos respecto al comportamiento generalizado de los fabricantes.

Se determinó a través de la revisión de la normatividad legal vigente y las estadísticas oficiales que si bien los medicamentos vencidos y demás productos farmacéuticos no son significativos en cuanto a su cantidad, como otros residuos peligrosos, sí representan un peligro para la salud humana y el medio ambiente, dado que su generación ha aumentado a través del tiempo.

Se identificó que la incineración es el tratamiento más utilizado y estipulado por la normatividad legal vigente para la disposición final de los residuos peligrosos, particularmente para los medicamentos y productos farmacéuticos. Sin embargo, aún sigue siendo insuficiente el número de instalaciones autorizadas y la tecnología necesaria para el manejo de los residuos peligrosos a nivel nacional.

Referencias

1. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia –ANDI–. Plan de devolución de medicamentos o fármacos vencidos. 2012. [en línea]. Disponible en: <http://www.andi.com.co/archivos/file/Vicepresidencia%20Desarrollo%20Sostenible/ECOPUNTO/PUNTO%20AZUL%20-%20Comunicado%20Institucional%20V2.pdf>. Consultado el 01 de Julio de 2014.
2. Bila M. D., Dezotti M.: Fármacos no medio ambiente. Quím.Nova. 26, 523-530. (2003).
3. Bolong N., Ismail F. A., Salim M., Matsuura, T.: A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. Desalination. 239, 229-246. (2009).
4. Brain R. A., Hanson M. L., Solomon K. R., Brooks, B. W.: Aquatic plants exposed to pharmaceuticals: effects and risks. Rev Enviro Contam Toxicol . 192,67-115. (2008).
5. DNP-UPA, FIUN-PIRS.: Estudio sobre los Residuos Peligrosos en Colombia: Un Primer Paso Para la Acción. (1998).
6. Environmental Protection Agency –EPA–: Guides to Pollution Prevention the Pharmaceutical industry. (1991).
7. Filho W.R., Barreiro J.C., Vieira E.M. & Cass Q.B.: Fármacos, ETEs e corpos hídricos. Revista Ambiente & Agua. 2, 54-61. (2007).
8. IDEAM.: Informe Nacional sobre Generación y Manejo de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, año 2011. Bogotá, D. C., 62 p. (2012).
9. Jelic, A., Gros, M., Ginebreda, A., Cespedes, R., Ventura, F., Petrovic, M., Barcelo, D.: Ocurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. Water Rest 45, 1165-1176. (2011).
10. Kim Y., Choi K., Jung J., Park S., Kim P.G. & Park J.: Aquatic toxicity of acetaminophen, carbamazepine, cimetidine, diltiazem and six major sulfonamides, and their potential ecological risks in Korea. Environ Int. 33, 370-375. (2007).

11. MADS.: Resolución 371. Por medio de la cual se establecen los elementos que deben ser considerados en los planes de gestión de devolución de productos posconsumo de fármacos o medicamentos vencidos. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario oficial. 6 de febrero de 2009. (2009).
12. MADS.: Resolución 1164. Por la cual se adopta el manual de procedimientos para la gestión integral de los residuos hospitalarios y similares. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario oficial. 6 de septiembre de 2002. (2002).
13. MADS.: Decreto 4741. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario oficial. 30 de diciembre de 2005. (2005).
14. López Arias, Andrea; Suárez Medina, Oscar J.; Hoyos Martha C.: Perfil Nacional de Sustancias Químicas en Colombia. 2da. Ed. - Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial - UNIDO, (2012).
15. Sarmah A. K., Meyer M.T., Boxall A.B.: A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*. 65, 725-759. (2006)
16. Vásquez V.J.: El sector farmacéutico en el marco de las negociaciones del Tratado de Libre Comercio con los Estados Unidos. *Perfil de Coyuntura Económica*. 5, 33-43. (2005).
17. Yu T., Yu-Chen A., Panchangam S., Andy P., Yang P., Lin, C.: Biodegradation and bio-sorption of antibiotics and non-steroidal anti-inflammatory drugs using immobilized cell process. *Chemosphere*. 84, 1216-1222. (2011).



Evaluación del cambio en la concentración de dióxido de carbono en una corriente de gas mediante el uso de *Chlorella vulgaris*

Iván Rodrigo Astros*, María Camila Navarro**, Adriana Inés Páez***

Fundación Universidad de América, Bogotá. Grupo de Investigación: Fotocatálisis.
Línea de investigación: Biorremediación

FECHA DE ENTREGA: 30 DE NOVIEMBRE DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 13 DE MAYO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 21 DE MAYO DE 2014

Resumen *Chlorella vulgaris* tiene una eficiencia de 38 % en la remoción de dióxido de carbono presente en una corriente de gas, el estudio se fundamenta en la experimentación con especies de microalgas nativas de Colombia para su uso potencial como tratamiento en procesos industriales de combustión. El trabajo se inició con una revisión bibliográfica para identificar las condiciones de cultivo adecuadas de la microalga *Chlorella vulgaris*, posterior a esto se realizó el diseño básico de un biorreactor para llevar a cabo el cultivo y determinar la cinética de crecimiento de la microalga, después se propuso el diseño de experimentos que incluye dos factores: Concentración de dióxido de carbono [%CO₂ v/v] y duración del fotoperíodo; se realizaron cuatro tratamientos para verificar el comportamiento de las variables por acción de la microalga en diferentes condiciones. Finalmente se analizaron los resultados y se determinó el tratamiento más eficiente. Los resultados muestran que el tratamiento más eficiente es aquel en el que los factores tienen los mayores valores, es decir, el fotoperíodo más largo y la mayor concentración de CO₂.

Abstract *Chlorella vulgaris* is 38 % efficient in removing the carbon dioxide that is present in a gas stream. This study was based on experiments carried out with species of microalgae native from Colombia to be used in industrial processes of combustion. We started with a bibliographical review in order to identify the adequate culture conditions of the microalgae *Chlorella vulgaris*. After this, we designed a bioreactor to do the culture and determine the growth kinetics of the microalgae. Also, we proposed the design of experiments that included two factors: concentration of carbon dioxide [%CO₂ v/v] and photoperiod length. We carried out four treatments to verify the variable behavior by means of the microalgae in different conditions. Finally, we analyzed the results and determined the most efficient treatment, which, according to the results, is the one where

* Estudiante de pregrado de Ingeniería Química. ivan.astros@gmail.com

** Estudiante de pregrado de Ingeniería Química.

*** Microbióloga Industrial. adriana.paez@javeriana.edu.co

the factors have greater values. This means, the longest photoperiod and the largest concentration of CO₂.

Palabras Clave: biorreactor, cinética de crecimiento, combustión, *Chlorella vulgaris*, dióxido de carbono, fotoperiodo.

Keywords: bioreactor, growth kinetics, combustion, *Chlorella vulgaris*, carbon dioxide, photoperiod.

1. Introducción

Las emisiones de CO₂ generadas por diversas industrias, y los efectos provocados sobre el calentamiento del planeta, promueven el desarrollo de tecnologías innovadoras para controlar las emisiones de este gas de efecto invernadero. El empleo de microorganismos como biorremediadores en las industrias que emiten gases de combustión a la atmósfera tiene como fin proponer una solución, ya que la mayoría de procesos requiere de un combustible fósil, el cual genera una serie de emisiones tóxicas y contaminantes, principalmente dióxido de carbono como resultado de la oxidación de los combustibles durante la combustión.

2. Metodología

3. Microalgas

Las microalgas fueron obtenidas de la Universidad Nacional de Colombia la cual presenta la clasificación del cuadro 1.

| | |
|----------|---------------------------|
| Reino | <i>Plantae</i> |
| Subreino | <i>Thalophyta</i> |
| Phylum | <i>Chlorophyta</i> |
| Clase | <i>Chlorophyceae</i> |
| Orden | <i>Chlorococales</i> |
| Familia | <i>Chloropitae</i> |
| Género | <i>Chlorella vulgaris</i> |

Cuadro 1. Clasificación científica para *Chlorella vulgaris*. Fuente: [1]. Modificado por los Autores.

3.1. Cultivo de Microalgas

Para el cultivo se estableció según [1], factores que inciden en el crecimiento del microorganismo; algunos de los factores importantes para llevar a cabo el cultivo de microalgas se presentan en el cuadro 2.

| Factor | Valor |
|-----------------|----------------|
| Luz [14] | 650-22,200 Lux |
| Temperatura [4] | 18-25 °C |
| pH [1] | 7-8 |

Cuadro 2. Condiciones de cultivo.

3.2. Condiciones de cultivo

La microalga se cultivo con intensidad lumínica de 1200 lux medida con el luxómetro, se obtiene el CO₂ de un tanque de almacenamiento desplazado por un compresor que suministra el gas al biorreactor. Se utiliza el medio de cultivo BBM, cuya composición se muestra en el cuadro 3. El pH final del medio BBM es de 6.6, no se consideró adecuado incrementar el valor del pH ya que la adición de un nuevo componente alteraría el medio de cultivo.

| Componente | Cantidad |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| Solución de Macronutriente | |
| NO ₃ Na | 25 g/L |
| CaCl ₂ · 2 H ₂ O | 20 g/L |
| MgSO ₄ · 7 H ₂ O | 7.5 g/L |
| HK ₂ PO ₄ | 7.5 g/L |
| H ₂ KPO ₄ | 17.5 g/L |
| NaCl | 2.5 g/L |
| Solución de Micronutriente | |
| EDTA Na ₂ | 50 g/L |
| KOH | 31 g/L |
| FeSO ₄ · 7 H ₂ O | 4.98 g/L |
| H ₂ SO ₄ | 1 g/L |
| H ₃ BO ₃ | 11.42 g/L |
| ZnSO ₄ · 7 H ₂ O | 8.8 g/L |
| MnCl ₂ · 4 H ₂ O | 1.44 g/L |
| MoO ₃ | 0.71 g/L |
| CuSO ₄ · 5 H ₂ O | 1.57 g/L |
| Co(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O | 0.49 g/L |

Cuadro 3. Composición del medio de cultivo BBM. Fuente: [18]. Modificado por los Autores.

Se preparó un pre inóculo al cual se le realizaron pruebas de pureza para verificar la ausencia de microorganismos contaminantes. El cultivo se realizó en un biorreactor del tipo columna de burbujeo ya que es la configuración recomendada para el cultivo de algas. [6]

3.3. Diseño del biorreactor

Se siguió el modelo de biorreactor tipo columna de burbujeo recomendado para el cultivo de *Chlorella vulgaris*, en el cual la relación altura diámetro está entre 3 y 6 [6]. Debido a que se usaron 2.5 L de medio de cultivo y 50 mL de preinóculo, el volumen total del biorreactor debe ser de mínimo 3 L, por lo cual se seleccionó un diámetro interno de 10 cm y una altura de 32 cm. El tiempo de retención total fue de cinco días (120 horas), ya que a este tiempo se alcanza la fase estacionaria de crecimiento celular.

El montaje que se siguió se aprecia en la figura 1. La concentración de CO₂ se monitoreó con ayuda del sensor K-33 ICB.

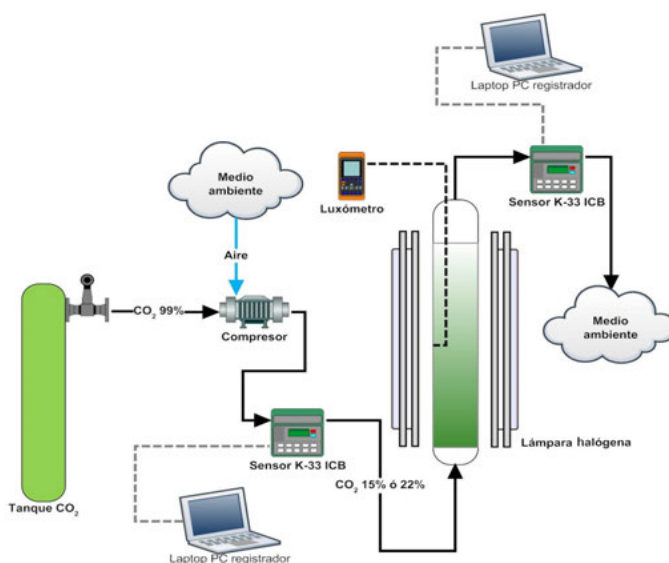


Figura 1. Esquema del montaje para el desarrollo de los tratamientos.

4. Resultados

El objetivo de la investigación permitió evaluar el cambio en la concentración de dióxido de carbono a causa del metabolismo del CO₂ por parte de la microalga

Chlorella vulgaris al hacer circular un gas a través del medio de cultivo. Se probaron varios conjuntos de tratamientos mediante un diseño de experimentos de dos niveles (2^K). Los factores que se usaron fueron la Concentración de CO_2 , con un nivel alto ($22\% \text{CO}_2$ v/v) y bajo ($15\% \text{CO}_2$ v/v), y la duración de los fotoperíodos, con un nivel largo (16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.) y corto (10 horas de luz y 14 horas de oscuridad).

La cinética de crecimiento del alga siguió un modelo logístico en el cual se observa que a medida que el tiempo pasa la curva adquiere una tendencia lineal a un tamaño de población determinado ($1,1E7$ Células/mL). Este tipo de comportamiento durante los tratamientos indica que no se sobrepasaron las condiciones de cultivo máximas que puede soportar *Chlorella vulgaris* [14].

De la ecuación 1 del modelo logístico se puede obtener el valor máximo de la velocidad de crecimiento relativa al tiempo (μ) de 0.0029 h^{-1} .

$$C.V. = \frac{1.1 \times 10^7 \cdot 2.15 \times 10^6 \cdot e^{0.0029t}}{1.1 \times 10^7 + 2.15 \times 10^6 \cdot e^{0.0029t} - 1} \quad (1)$$

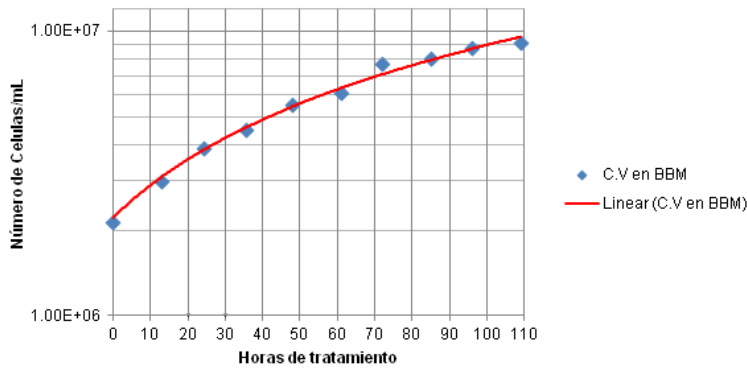


Figura 2. Curva general de crecimiento para *Chlorella vulgaris* en medio BBM

El mejor tratamiento que se logró fue aquel en el cual se tenían los mayores valores de fotoperíodo y concentración de dióxido de carbono, lo cual altera el metabolismo del alga, incrementando rápidamente su población celular disminuyendo así en una mayor proporción el dióxido de carbono presente en el ambiente. En general se puede ver que el crecimiento celular es similar en todos los tratamientos, variando solo la velocidad de crecimiento durante los primeros días y alcanzando la fase estacionaria aproximadamente al quinto día.

El análisis de los factores se realizó calculando el diferencial de la concentración de dióxido de carbono a la salida del biorreactor para los tratamientos y las réplicas entre las muestras 1 y 10. Los datos promedio obtenidos para cada

tratamiento se encuentran reportados en figura 3. El factor fotoperíodo es el que va a afectar en mayor medida el diferencial de la concentración de dióxido de carbono a la salida del biorreactor.

| | | %CO ₂ v/v | | |
|-------------|-------------------|----------------------|-------|-------|
| | | 22% | 15% | |
| FOTOPERIODO | Δ%CO ₂ | | | |
| | 16 Horas | | 7,655 | 7,676 |
| | | | 8,212 | 8,799 |
| | 10 Horas | | 5,88 | 7,103 |
| | | 6,278 | 7,936 | |

Figura 3. Resultado de los tratamientos.

Todos los tratamientos mostraron una tendencia similar en la disminución de dióxido de carbono, esta tendencia se observa en la figura 4 y se puede expresar mediante una función polinómica que se ajuste a la curva contenida en la ecuación 2. Esta similitud en la tendencia de las gráficas coincide con los resultados del análisis de varianza, en el cual la combinación de los factores no tiene una gran incidencia en la capacidad de fijación de la microalga, ya que esta capacidad de fijación está ligada directamente a la concentración celular, y al tenerse proporcionalidad en la tasa de crecimiento celular durante los diferentes tratamientos y sin importar las condiciones a las que se sometiera la microalga, la capacidad de fijación de dióxido de carbono fue de 1.55 [%CO₂ v/v]/día.

$$y = -7 \times 10^{-40}x^6 + 3 \times 10^{-32}x^5 - 4 \times 10^{-25}x^4 + 4 \times 10^{-18}x^3 - 2 \times 10^{-11}x^2 + 3 \times 10^{-5}x - 7.0354 \quad R^2 = 0.9987 \quad (2)$$

En los cuatro tratamientos se puede ver un comportamiento de “escalera” entre las diferentes muestras que se tomaron, este comportamiento se debe al metabolismo celular de *Chlorella vulgaris*, que consiste en un Ciclo de Calvin similar al de las plantas, con una fase luminosa y una oscura. Durante la fase luminosa, se tiene un valor constante en la tasa de fijación de dióxido de carbono y un ligero aumento en la concentración celular, ya que durante este período el alga obtiene la energía lumínica (ATP) y hace fijación del dióxido de carbono presente en el aire sin aumentar su población celular debido a que no se ha reducido el material inorgánico a material orgánico, es decir la transformación del dióxido de carbono a glucosa, por lo cual no se puede apreciar un gran cambio en el %CO₂ a la salida del biorreactor. Durante la fase oscura, el alga no hace fijación del dióxido de carbono en el aire, solo realiza división celular usando al dióxido de carbono como fuente de carbón para sintetizar azúcares, y por esta

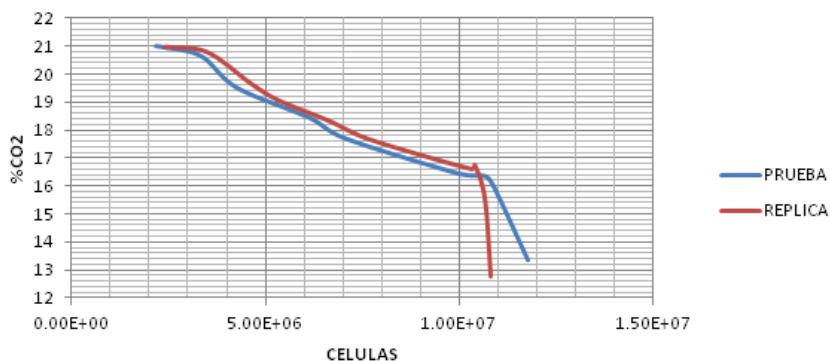


Figura 4. Resultados del primer tratamiento.

razón, al realizar la medida de la concentración de dióxido de carbono a la salida del biorreactor al inicio del nuevo fotoperíodo, se presenta un cambio abrupto en la concentración celular y en el %CO₂.

5. Conclusiones

- La evaluación de los tratamientos muestra que no existen diferencias significativas en la disminución de la concentración del dióxido de carbono, cuyo valor promedio fue de 6,5 %CO₂ v/v, correspondiente a un 38 % de eficiencia.
- El dimensionamiento del biorreactor fue el adecuado para el desarrollo de los tratamientos, cumpliendo con los requerimientos de agitación, cantidad de luz y distribución de nutrientes necesarios para alcanzar la fase de crecimiento estacionario en un periodo de tiempo corto y una considerable disminución de dióxido de carbono.
- Los cultivos bajo las condiciones de temperatura, concentración de dióxido de carbono, medio de cultivo e intensidad lumínica, alcanzaron la concentración celular necesaria para la disminución del dióxido de carbono comparable a la obtenida por otros investigadores.
- La cinética de crecimiento sigue un modelo logístico bajo condiciones de operación diferentes, teniéndose una reproducibilidad del comportamiento aunque algunas diferencias en la concentración máxima de acuerdo al fotoperíodo de luz usado.
- La capacidad de fijación de dióxido de carbono no presentó diferencias significativas bajo las diferentes condiciones de operación, confirmando que los factores intensidad de luz y concentración de dióxido de carbono no influyen de forma directa en la capacidad de fijación y que esta capacidad está determinada en mayor proporción por la concentración celular.

- Estudios relacionados, reportan para tratamientos similares una disminución del 10 %, que es mayor a lo obtenido, debido a que el medio de cultivo, fue suplementado con nutrientes, que mejoraron el crecimiento microalgal y por ende la velocidad en la fijación del CO₂.

Agradecimientos

A Adriana Páez, Microbióloga Industrial, y Directora de este proyecto, ya que gracias a su guía y apoyo se logro desarrollar con éxito este trabajo.

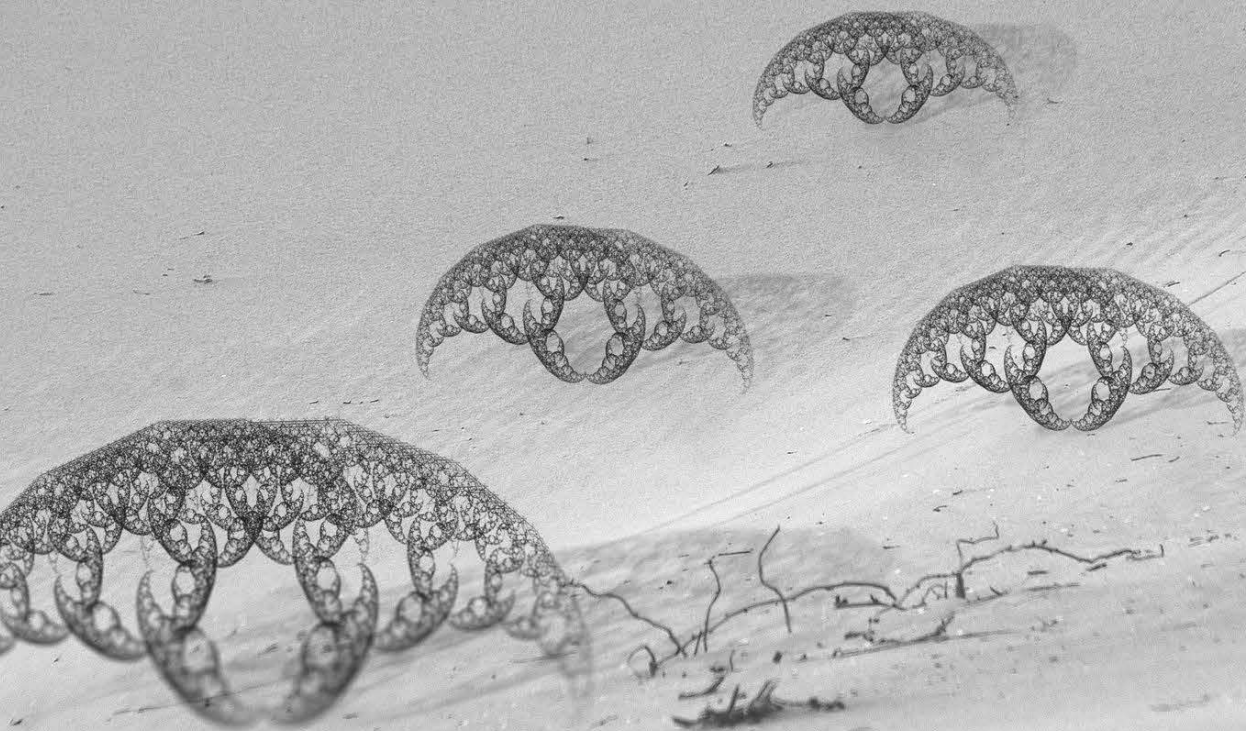
A la Universidad de América por darnos los conocimientos necesarios para obtener el título de Ingenieros Químicos y desarrollar este proyecto.

Por último agradecemos a nuestras familias y todos aquellos que nos han acompañado a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Referencias

1. Abalde J., Cid A., Fidalgo J. P., Torres E., Herrera C.: Microalgas: Cultivo y aplicaciones. Coruña: Universidad de la Coruña, 210p. (1995)
2. Agencia de protección ambiental de Estados Unidos.: Guía del Medio Ambiente de la EPA. Documento No. 520/B-94-001. Washington, DC: La agencia. (1999)
3. Bei, W.: CO₂ bio-mitigation using microalgae. En: Apply Microbiological Biotechnology. Mayo, vol.79, p. 707-718 (2008)
4. Chaparro De Barrera, A.: Curso de fisiología vegetal. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 52p. (2010)
5. Chaumont, D.: Biotechnology of algal biomass production: A review of systems for outdoor mass culture. En: Journal of apply Phycology. Agosto, vol.1, p. 593-604 (1993)
6. Chisti Y., Murray Moo-Young.: Bioreactors, Encyclopedia of Physical Science and Technology. En: Academic Press. vol. 2, p. 247-266 (2002)
7. Gobierno De Navarra.: Calidad del aire, Dióxido de carbono [En línea]. Disponible en: http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Calidad+del+aire/Informacion/Contaminantes/CO2.htm [citado Abril 06, 2011]
8. Grobbelaar, J.: Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures. En: Journal of apply Phycology. Octubre, vol. 12, p. 201-206 (2000)
9. Guevara L, E.: Diseño, construcción y caracterización hidrodinámica de un biorreactor multifuncional. Trabajo de grado Ingeniería de Alimentos. Huajuapán de Leon: Universidad tecnológica de la mixteca. Facultad de Ingeniería, 107p. (2004)
10. Instituto Colombiano de Normas Técnicas Y Certificación.: Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008, 110 p. (2008)
11. Javanmardian M., Palsson B.: High-density photoautotrophic algal cultures: Design, construction, and operation of a novel photobioreactor system. En: Biotechnoly Bioengineering. Diciembre, 1991, vol. 38, p. 1182-1189 (1991)
12. Li Y., Horsman M., Wu N., Lan CQ., Dubois-Calero N.: Biofuels from microalgae. En: Biotech Prog. ASAP Article. Julio, 2008, vol. 4, p. 815-820 (2008)
13. Matsumoto H.: Influence of CO₂, SO₂ and NO in flue gas on microalgae productivity. En: Journal Chemical Engineering Japan, 1997, vol. 30, p. 620-624 (1997)

14. Pearsall W. H., Loose L.: The Growth of *Chlorella Vulgaris* in pure culture. En: Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1936, Vol. 121, p. 451-501 (1936)
15. Pirt, John.: A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: design and performance. En: Journal of Chemical Technoly & Biotechnoly. Enero, 1983, vol. 33, p. 35-58 (1983)
16. Pirt, John.: The photosynthetic efficiency of *Chlorella* biomass growth with reference to solar energy utilization. En: Journal of Chemical Technoly & Biotechnoly. Agosto, 1980, vol. 30, p. 25-34 (1980)
17. Skjanes K., Lindblad P., Muller J.: Bio CO₂-a multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products. En: Biomolecular Engineering. Mayo, 2007, vol. 24, p. 405-413 (2007)
18. Stein, J. R.: Handbook of Phycological Methods, Culture Methods and Growth Measurements. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. 460p. (1973)
19. Usui N., Ikenouchi M.: The biological CO₂ fixation and utilization project by RITE (1): highly-effective photobioreactor system. En: Energy Conversion Management. 1997, vol. 38, p. 487-492. (1997)
20. Verlaan P., Vos J-C., Van't Riet K.: From bubble column to air-lift-Loop Reactor: Hydrodynamics and Axial Dispersion of the Transition Flow Regime, 2nd International Conference on Bioreactor Fluid Dynamics. En: Elsevier Applied Science Publishers. Enero, 1988, p. 259-261 (1988)
21. Yeoung, S. Y., Jong, M. P.: Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation. En: Korean Journal of Chemical Engineering. Septiembre, 1997, vol. 4, p. 297-300 (1997)



Diseño de un fotobiorreactor *Airlift* a escala banco

Diego Rubio Fernández*, Jennifer Alexandra Sierra Herrera**, Steven Ruiz Fonseca***, Juan Andrés Sandoval Herrera†

Grupo de investigación BIOTECFUA

FECHA DE ENTREGA: 1 DE NOVIEMBRE DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 20 DE ENERO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 28 DE MARZO DE 2014

Resumen En este trabajo se evaluó un Fotobiorreactor tipo *Airlift* (FBR) a escala banco para el cultivo y generación de biomasa microalgal. El proceso de evaluación se desarrolló en diferentes etapas desde el análisis de variables de diseño, selección de materiales, ensamblaje del equipo y pre-experimentación.

El equipo comprende cuatro subsistemas: presión, temperatura, agitación y lumínico; cada uno de estos es descrito de acuerdo con los parámetros relevantes que garantizan el adecuado diseño teórico de los mismos. El funcionamiento del equipo fue verificado lo que permitió la determinación de las condiciones y rangos de operación básica del fotobiorreactor.

Abstract This paper evaluates a bench-scale airlift photobioreactor (PBR) for the culture and generation of microalgal biomass. The evaluation process was developed in different stages from the analysis of design variables, selection of materials, equipment assembly, and pre-experimentation. The equipment has four sub-systems: pressure, temperature, mixing, and light. Each one of those is described according to the relevant parameters that guarantee their adequate theoretical design. The functioning of the equipment was verified and this allowed us to determine the conditions and ranges of the photobioreactor basic operation.

Palabras Clave: fotobiorreactor *Airlift*, biomasa, microalgas.

Keywords: Airlift photobioreactor, biomass, microalgae.

* Biólogo. MsC en Ciencias Biología, Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador Tiempo Completo Grupo BIOTECFUA, Universidad de América Bogotá, Colombia. diego.rubio@profesores.uamerica.edu.co

** Ingeniero Químico. Programa de ingeniería química, facultad de ingenierías. Universidad de América, Bogotá, Cundinamarca, Colombia. electronico:ingjash@gmail.com

*** Ingeniero Químico. Programa de ingeniería química, Facultad de Ingenierías. Universidad de América, Bogotá, Cundinamarca. Colombia. steven90rf@hotmail.com

† Ingeniero Químico. Master en Formulación y Tecnología del Producto, Universidad Internacional de Andalucía, España. Docente universidad de América. Co-director del proyecto. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

1. Introducción

El concepto fundamental de fotobiorreactor se centra en equipos que permiten cultivos libres de contaminación y con la capacidad de proveer las condiciones básicas ideales para microorganismos fotótrofos como microalgas (Molina et al, 1999;). Al contextualizar la definición en aspectos más técnicos, se pueden definir los fotobiorreactores (FBR) como contenedores o recipientes transparentes que tienen como ventajas operativas la capacidad de monitoreo de las condiciones de los cultivos y en algunos casos el control riguroso de las variables que intervienen en el proceso de producción, la disminución de la probabilidad de contaminación de los cultivos, el potencial de uso en procesos ambientales como la filtración de aguas, la captura de CO_2 , acoplados con la obtención de biomasa y de compuestos de alto interés industrial [5,14,30].

El conocimiento actual a nivel de fotobiorreactores es extenso, generado a partir de problemas cada vez más particulares y específicos como la aplicación de dinámica de fluidos al diseño de fotobiorreactores [18], la captura de CO_2 y el tratamiento de aguas acoplada al escalamiento de biorrefinerías, aplicación de dinámica de fluidos computacional para definir las condiciones de iluminación de la biomasa, transferencia de CO_2 a la biomasa, la transferencia de luz, la interacción entre modelos fotosintéticos y procesos de producción de biomasa, entre otros.

Sin embargo, las aplicaciones de cultivo en fotobiorreactor a nivel industrial es decir, en biorrefinerías, son aún limitadas debido principalmente a los costos operativos de los procesos que en muchas oportunidades no pueden competir con otro tipo de cultivos como el de la palma de aceite, ni con el precio del petróleo en caso de aplicaciones de biocombustibles [22]. El diseño de fotobiorreactores implica la aplicación de conceptos biológicos [22] y su interacción desde el punto de vista de diseño e ingeniería.

Estos fundamentos teóricos se tuvieron en cuenta para desarrollar un proceso de diseño y puesta en marcha de un FBR a escala banco. Se inicia con la identificación de los tipos, las configuraciones, los parámetros y variables que afectan el funcionamiento del FBR. Seguido de la selección de los materiales para su construcción, ensamble y ajuste de las condiciones de operación del mismo, analizado a partir de principios teóricos.

2. Materiales y métodos

2.1. Selección del material de los tubos concéntricos

En general los fotobiorreactores se fabrican en materiales de construcción que cumplan con características de alta transparencia, flexibilidad, durabilidad, toxicidad nula, resistencia a productos químicos, resistencia a la intemperie y bajo costo (Tabla 1); así mismo, que presenten otra serie de propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas [2,29].

En el presente trabajo se compararon cualitativamente tres materiales para la construcción del equipo: el acrílico, el polietileno y el vidrio flotado con base

en las principales propiedades de cada material (cuadro 1) los cuales fueron seleccionados por el efecto sobre el medio de cultivo y el crecimiento de biomasa: el calor específico, la conductividad térmica, transmisión de luz, la energía retenida en las paredes del material.

| Propiedad | Valor (1 a 5) | Acrílico rígido [26] | Polietileno alta densidad [27] | Vidrio flotado [28] |
|--------------------------------------------|---------------|----------------------|--------------------------------|---------------------|
| Calor específico (J/kg K) | 2 | 1465 | 2936,7 | 750 |
| Conductividad térmica (W/m K) | 3 | 0,18 | 0,29 | 1 |
| Transmisión de luz (%) | 5 | 92 | 80 | 90 |
| Densidad (kg/m^3) | 3 | 1180 | [945 a 960] | 2500 |
| Energía Retenida (MJ kg m^{-1}) | 3 | 13,5 | 72,8 | 15,9 |

Cuadro 1. Propiedades de los materiales de construcción.

2.2. Diseño base y dimensionamiento del fotobiorreactor

El diseño base de fotobiorreactores hace referencia a su configuración geométrica [5]. Desde este punto de vista las configuraciones son básicamente en forma rectangular o de panel plano y en forma de cilindro o reactores tubulares, buscando una relación adecuada superficie-volumen que permita maximizar el paso de luz en el espacio del fotobiorreactor.

Los reactores tipo *Airlift* son una variación de los reactores tubulares. La principal diferencia entre los reactores *Airlift* y las columnas de burbujeo radica en el tipo de flujo del fluido o mezcla gas-líquido. En la columna de burbujeo o en el FBR tubular, no se controla el patrón generado por la interacción entre el gas y el líquido. Por el contrario, en los reactores tipo *Airlift* (ARL), diseño que cuenta con dos tubos concéntricos, el cilindro interior *riser* permite canalizar el flujo de aire y por lo tanto de la mezcla gas-líquido, generándose flujo ascendente.. El cilindro externo *downcomer*, genera un espacio para el flujo descendente del líquido posterior a su desgasificación. En otras palabras, los procesos de transferencia de luz y transferencia de masa se dan de forma separada en el FBR-ARL.

Así mismo, este tipo de diseño tiene una influencia significativa en la dinámica de fluidos del reactor y por lo tanto en el rendimiento y la productividad de biomasa [18]; y al ser sus patrones hidrodinámicos más definibles, se hace posible desarrollar modelos predictivos con una buena confiabilidad. Por tal motivo, en este caso de estudio se seleccionó el diseño de un fotobiorreactor *Airlift* (FBR-ARL), con configuración de tubos.

Para las consideraciones de diseño del FBR-ARL se emplearon ecuaciones que permitieron el dimensionamiento del equipo especificando el diámetro del *riser* y *downcomer*, el volumen y altura total, así como el volumen y la altura de operación. Por lo tanto el procedimiento de cálculo se inició estableciendo como consideración inicial el diámetro del *riser* (D_r), teniendo en cuenta la viabilidad de manipulación y la disponibilidad del material en el mercado con las medidas requeridas.

La adecuada selección del diámetro del *riser*, tiene un efecto significativo en las medidas del diámetro y altura del *downcomer*, puesto que el aumento o la disminución de estas influyen directamente en la distribución de luz dentro del FBR-ARL, los fenómenos de transferencia y la productividad volumétrica del FBR. Las siguientes consideraciones son la evidencia física de dicha influencia: si existe aumento, se pueden presentar sucesos tales como: aumento en las zonas oscuras, mala distribución de aire dentro del área de transferencia; debido a que la mayoría de gas permanece mayor tiempo en el canal de ascenso aumentando su acumulación en la parte superior y por ende, la formación excesiva de espuma. Por el contrario, si se presenta disminución, conllevaría la aparición de la fotoinhibición por aumento en la intensidad lumínica, la generación de una acelerada distribución de gases a lo largo del canal de descenso, lo cual puede llegar a producir turbulencias, y en general, afectaría el crecimiento microalgal dentro del equipo.

Las ecuaciones de dimensionamiento [12] permiten relacionar las medidas básicas del FBR-ARL. Para el cálculo del diámetro del *downcomer* [ecuación (1)] se despeja D_d tomando el límite superior del rango (0.6) como valor de referencia con el fin de obtener el valor máximo de dicho diámetro.

$$D_r = [0.3 \text{ a } 0.6]D_d \quad (1)$$

La altura total del equipo (H) (ecuación (2)) también relaciona el límite mayor de dicho rango.

$$H = [3 \text{ a } 6]D_d \quad (2)$$

A partir de la relación de diámetros se calcula el volumen total del *downcomer* (V_{Td}) (ecuación (3)) la cual se expresa en función del diámetro teniendo en cuenta que el volumen de un cilindro se expresa en función del área (A_{base}) y la altura (H), donde $A_{base} = \frac{\pi}{4}D_d^2$. Organizando algebraicamente se obtiene:

$$V_{Td} = \frac{\pi H D_d^2}{4} \quad (3)$$

El volumen del equipo se determina por la suma del volumen total del *downcomer* (V_{Td}) y las tapas del equipo (V_t). El volumen de las tapas se calcula teniendo en cuenta su geometría y posición en el FBR a través de la ecuación (4).

$$V_T = V_{Td} + V_t \quad (4)$$

Para este caso el valor (V_t) equivale a cero ya que no genera cambios al volumen interno del FBR-ARL, porque se encuentran superpuestas a la parte

superior del *downcomer*; el cálculo del volumen de operación (V_{op}) se realizó mediante la ecuación (5). Se asume el punto medio del intervalo (0,8).

$$V_{op} \approx [0.7 \text{ a } 0.9]V_T \quad (5)$$

También se realizó el cálculo de la relación de áreas de transferencia, y la relación de área superficie en el reactor con las ecuaciones (6) y (7), pues éstas influyen directamente en el crecimiento de biomasa y en la productividad volumétrica del FBR, donde rd es el radio de *downcomer*, A_T área total y V_T volumen total.

$$\frac{A_r}{A_d} = \frac{\frac{\pi D_r^2}{4}}{\frac{\pi D_d^2}{4}} \quad (6)$$

$$\frac{A_T}{V_T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot rd \cdot (H + rd)}{H + \frac{\pi D_d^2}{4}} \quad (7)$$

2.3. Sistemas del fotobiorreactor (FBR)

Para maximizar las condiciones de producción de biomasa se tuvo en cuenta la implementación de cuatro sistemas de monitoreo de las variables de proceso principales: sistema de agitación, de iluminación, sistemas de control de presión y temperatura.

Sistema de agitación. El análisis de este sistema implica la selección de los elementos que permitieron la distribución de aire del FBR. Estos fueron el tipo de compresor, el tipo de difusor, la potencia mínima requerida por el compresor, el caudal mínimo de entrada y de mezclado que se interrelacionan con el difusor. A continuación se presentan las Ecuaciones (8) y (9) empleadas para definir la potencia volumétrica $\frac{P}{V}$ del compresor la cual representa la energía necesaria que ejerce el caudal suministrado para la agitación dentro del equipo, la potencia volumétrica se relaciona directamente con la potencia por unidad de tiempo (P), pues la variación en la velocidad de flujo del fluido produce un cambio en la fuerza motriz del compresor. Se calcula de acuerdo con el procedimiento propuesto por Kochem (2010):

$$\frac{P}{V} = \frac{\rho g V_g}{1 + \frac{A_d}{A_r}} \quad (8)$$

Donde, $\frac{P}{V}$ es la potencia requerida por metro cubico (W/m^3), ρ es la densidad del agua (kg/m^3), g es la gravedad (m/s^2), A_d y A_r son las áreas del *downcomer* y del *riser*, respectivamente, en m^2 y V_g es la velocidad superficial del gas (m/s). Basándose en el área superficial del reactor, este V_g se calcula con la ecuación (9) donde Q es el caudal de aire en (m^3/s), p es la presión del compresor en (bar) y P es la potencia del equipo en (kilowatts).

$$V_g = \frac{Q}{A_d + A_r} \quad (9)$$

$$Q = \frac{P \cdot 600}{p} \quad (10)$$

El dimensionamiento del difusor involucró el análisis de la geometría del mismo, escogiendo la de tipo disco gracias a las ventajas que éste presenta en el acoplamiento con la estructura del equipo, así como también su relación con el cálculo del caudal de entrada, de mezclado y con el número de orificios.

El método utilizado para el cálculo del número de orificios aproximado se realizó fijando como primer parámetro la relación de diámetros, seguido del despeje del factor de corrección, de acuerdo con las ecuaciones de [8] entonces:

$$\frac{d}{D} = \frac{\text{diámetro}}{D} \quad (11)$$

Donde: d es el diámetro del orificio (m) y D es el diámetro de la tubería en (m). Para el cálculo de la caída de presión y el factor de corrección, se tiene en cuenta que estos dependen de la altura y diámetros del reactor. Haciendo uso de diversas analogías y resultados de investigaciones anteriores el autor describe las ecuaciones (12) y (13):

$$\Delta P(\text{difusor}) = 0.01 + 0.2 \left(1 - e^{\left(\frac{-d}{2H}\right)}\right) \quad (12)$$

Donde: d , diámetro de la tubería (m), H , altura de reactor (m), ΔP cambio de presión. La ecuación (13) la obtuvo el autor luego de analizar el comportamiento del factor de correlación con el cambio del número de Reynolds y permite el ajuste del factor de corrección, a través de:

$$Cd_{or} = 0.82 \left(\frac{t}{d}\right)^{0.12} = 0.82 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.12} \quad (13)$$

Donde: Cd_{or} es el factor de descarga en el orificio y $\frac{t}{d}$, es la relación entre el espesor y diámetro de orificios en el difusor. Y por expresar una pérdida en la presión del equipo se puede relacionar también con la relación de diámetros del mismo.

Para el cálculo del caudal inicial tentativo del orificio, teniendo en cuenta la similitud con el medidor de flujo de placa de orificio y las siguientes consideraciones según [10]:

- La similitud que tiene con una placa de orificio en cuanto a la distribución del fluido, ya que este permite una contracción rápida y repentina en áreas cercanas al orificio y una inmediata expansión a lo largo del tubo luego de regresar a el diámetro mayor de este.
- Las caídas de presión son similares en las alcanzadas por otras geometrías de medición de flujo variable. Sin embargo, una ventaja importante en esta tipología hace referencia al factor de descarga del medidor, el cual es “menor

que en los medidores de tubo Venturi o en boquillas” y, como consecuencia, las caídas de presión también lo son.

El procedimiento de cálculo se realizó por medio del despeje de las ecuaciones (14) y (15).

$$Q_o = C_d A_o \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\left(1 - \frac{A_o}{A_t}\right)^2}} \quad (14)$$

Donde: Q_o , caudal inicial del orificio. C_d , coeficiente de descarga. A_o , área del orificio. A_t , área de la tubería. ΔP , cambio de presión. g gravedad. Conociendo de antemano el caudal de entrada del reactor, se encontró el número de orificios aproximado a través de:

$$N \text{ de orificios} = \frac{Q \text{ compresor}}{Q_o} \quad (15)$$

Se realizó el cálculo del caudal de aire mínimo del compresor, en pies cúbicos por minuto (CFM). Se empleó el *software* libre disponible en la web: “calculadora de LFM a CFM”.

$$CFM = \frac{Ddu \cdot 1.5}{Ddb} \quad (16)$$

Donde: Ddu , es el diámetro del difusor de disco de la unidad de estudio; Ddb , es el diámetro del difusor de disco de la unidad de referencia bibliográfica.

Sistema de presión. La presión se mide a través de un sensor de presión diferencial MPX5700, instalado en la base del reactor, conectado a una electroválvula ON/OFF ubicada en la tapa del reactor. El conjunto de estos instrumentos permite controlar la presión que genera la acumulación de gases dentro del equipo. Dicha presión influye intrínsecamente en la agitación del medio porque puede llegar a ocasionar turbulencia y alterar la cantidad de oxígeno presente en el medio, el cual a su vez afecta la productividad de biomasa según lo expresó [9].

Por tal motivo, los rangos de trabajo deben mantenerse entre los 0 y 200 kPa manométricos. Sin embargo, para un funcionamiento correcto se deben consolidar teóricamente los valores mínimos de trabajo, a través del cálculo previo de la presión total del equipo apoyado en el análisis estadístico de los datos generados por el sistema de control. Se analizó la mecánica de fluidos básica del equipo, específicamente las pérdidas mayores y menores ocasionadas por los elementos del sistema de agitación. Así, la presión de salida del reactor está dada por:

$$P_f = H_{\text{recipiente}} \cdot \gamma_{H_2O} + H_{L\text{totales}} + \Delta P(\text{difusor}) \quad (17)$$

La presión inicial corresponde a la presión de la columna del líquido y se puede expresar a partir de la ecuación fundamental de la hidrostática:

$$P_o = H_{\text{recipiente}} \cdot \gamma_{H_2O} \quad (18)$$

Donde, $H_{\text{recipiente}}$ es la altura del recipiente y γ_{H_2O} es el peso específico del agua. La ecuación (19) se usó para calcular la sumatoria de las pérdidas de energía mayores debidas a la fricción del fluido en la longitud de la tubería tanto en el *riser* como en el *downcomer*:

$$H_L = \frac{L_r}{D_r} \cdot \frac{V_g^2}{2g} \cdot f_r + \frac{L_d}{D_d} \cdot \frac{V_g^2}{2g} \cdot f_d \quad (19)$$

Donde: L , longitud de la tubería, D , diámetro interno de la tubería riser o downcomer. V_g velocidad fluido en (m/s) hallada en apartado anterior, f factor de fricción, (adimensional). El f , se halla por medio del diagrama de Moody calculando previamente el Reynolds para cada caso, por medio de la ecuación (20), teniendo en cuenta que la tubería es de plástico (lisa) y usando los valores de las propiedades del aire a 25 °C, tomadas del libro de Mecánica de Fluidos [10]. En este caso, el Reynolds para el aire es:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (20)$$

Donde: d diámetro del orificio en (m), v velocidad del fluido gaseoso en (m/s), ρ densidad del aire en (kg/m³) y μ la viscosidad absoluta en (Pa·s). Las propiedades para la ecuación corresponden a $\rho = 1.184$ kg/m³ y $\mu = 1.55 \times 10^{-8}$ Pa·s.

Sistema de temperatura. El conjunto de este sistema se compone de dos sensores de temperatura “ML35” y un termostato. Para su funcionamiento se decide mantener por medio de la programación de un sistema de control cerrado un rango de trabajo entre 0 a 35 °C, porque dentro de este rango de temperaturas la microalga *Chlorella vulgaris* presenta crecimiento, según [1]. Sin embargo, según [6] para mejorar su productividad debe procurarse un rango de 18 °C a 27 °C.

Para la identificación del rango de temperatura para la puesta en marcha del fotobiorreactor se realizó un análisis estadístico descriptivo hallando la desviación estándar de cada uno de los datos registrados e identificando el intervalo de menor valor, el cual constituye el rango confiable de operación.

Sistema de iluminación. Para la escogencia de la fuente se tomaron como parámetros de selección las siguientes variables: eficiencia en procesos biológicos, vida útil y costo. Se usaron estas variables, por el efecto que tienen sobre el FBR. La eficiencia en procesos biológicos, fue seleccionada por el alcance que tienen las longitudes de onda de la fuente lumínica en el crecimiento microalgal. La vida útil, porque reduce los costos de mantenimiento del sistema lumínico y el costo por el valor final de construcción del FBR. La ecuación (21) facilita el cálculo de la potencia según [3]:

$$PI = \frac{\text{potencia}}{\text{volumen de operación}} \quad (21)$$

Donde: PI es la potencia lumínica; es la potencia requerida en el volumen del reactor. Las ecuaciones (22), (23) y (24) tomadas de DCM Systems, permitieron calcular de manera aproximada la intensidad lumínica, la iluminancia máxima y el rendimiento lumínico respectivamente:

$$\frac{F}{W} = I \quad (22)$$

Donde: F , flujo luminoso en lúmenes (lm), W , potencia de la fuente lumínica en vatios (W), I , intensidad lumínica en (W/m²).

$$\frac{F}{S} = E \quad (23)$$

Donde: F , flujo lumínico en lúmenes (lm); S , superficie expuesta a iluminación (m²); E , iluminancia máxima por cada cinta. El rendimiento lumínico se calculó con:

$$\frac{F}{W} = \eta \quad (24)$$

Donde: F , flujo luminoso en lúmenes (lm); W , potencia de iluminación de cada led (W), η , rendimiento por cinta en porcentaje (%). El rendimiento lumínico encontrado, hace referencia a la relación entre el flujo lumínico producido y la potencia eléctrica consumida. Los cálculos de la densidad de fotones se realizaron por medio del programa libre en línea de conversión de radiación lumínica, disponible en http://www.egc.com/useful_info_lighting.php.

2.4. Monitoreo y control de variables

Se emplearon tres lazos de control básicos que contemplan las variables de temperatura, iluminación y presión. Para la temperatura y presión se trabajaron lazos de control cerrado, en los que se crea una secuencia que permite establecer un ciclo de información para la retroalimentación de la señal para interpretarla, procesarla, compararla y corregirla. Como consecuencia, se produce el control automático de cada una de las variables. Para la iluminación artificial, el lazo de control cambió de configuración a lazo de control abierto, cuyo funcionamiento es similar al anteriormente descrito, pero con la diferencia de que la acción correctiva se realiza con la intervención humana, pues, el sistema cuenta con un indicador visual (alarma) que permite monitorear el comportamiento de la variable.

Dicho control se logra a través de la programación del controlador, responsable de realizar el acondicionamiento de las señales de entrada para compararlas con las condiciones y características preestablecidas por el programador, y posteriormente actualizar las salidas que pueden ejecutar las acciones correctivas. También incluyó el acople con un módulo de comunicación que permite la transmisión y visualización de datos cuando se establece la conexión equipo - computador, mediante un conector URS-32. La transmisión y visualización de los datos, se genera en una interfaz gráfica montada en el programa LabView.

3. Resultados y análisis de resultados

3.1. Diseño del fotobiorreactor

Estructura del fotobiorreactor. Se escogió el acrílico rígido y liso, con espesor de 2 mm como material de construcción. La estructura base del equipo, compuesta por tres partes principales, riser, downcomer y un tercer cilindro que se agrega con el fin de aumentar la resistencia mecánica del equipo, aumentar la protección a la contaminación y facilitar una mejor distribución lumínica. Conociendo los parámetros de diseño a definir y las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), se obtuvieron las siguientes del cuadro 2.

| Parámetro | Unidad | Descripción | Resultado |
|-----------|-----------------|---------------------------|-----------|
| V_T | L | Volumen total | 7 |
| V_c | L | Volumen cilindro | 7 |
| D_d | cm | Diámetro <i>downcomer</i> | 11,4 |
| D_r | cm | Diámetro <i>riser</i> | 7,3 |
| H | cm | Altura | 70 |
| V_{op} | cm ³ | Volumen de operación | 5600 |
| H_{op} | cm | Altura de operación | 54,7 |

Cuadro 2. Variables de dimensionamiento.

Relación de área de transferencia de masa y relación área - volumen o (área superficie). Establecidas las dimensiones generales del equipo en las unidades requeridas se realizó el cálculo de dicha relación a partir de las ecuaciones (6) y (7) dando como resultado un valor de 0,411 y como resultado de la relación área - volumen un valor $0,999 \approx 1$.

3.2. Sistemas del fotobiorreactor

Los resultados obtenidos para el sistema de agitación se describen a partir de las características a calcular en cada uno de los instrumentos que lo integran y se relacionan con los rangos obtenidos para el sistema de presión como se encuentra a continuación.

Compresor y presión del sistema. Para establecer los rangos de trabajo de la presión, y potencia del compresor se tuvieron en cuenta las características técnicas del equipo y del compresor entre las que se encuentran: los diámetros, el amperaje de 10 A, voltaje 12 V y potencia teórica de 120 W, las cuales al ser reemplazadas en las ecuaciones (8) a (20), arrojan los resultados presentados en el cuadro 3.

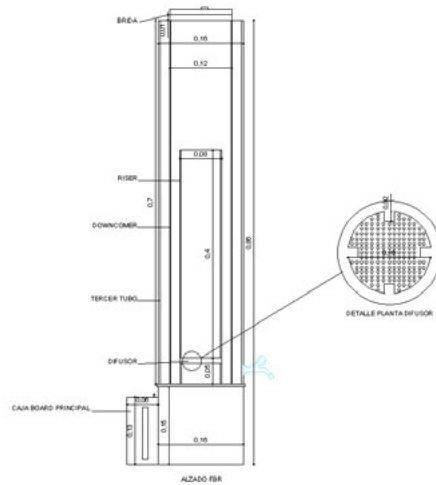


Figura 1. Planos y ensamble del fotobio reactor.



Figura 2. Planos y ensamble del fotobio reactor.

Difusor y cantidad de orificios. El funcionamiento del difusor se expresó en función del caudal que fluye a través de este. Para el cálculo del caudal de entrada a manejar, se utilizó una herramienta informática libre en línea [21] disponible en <http://www.csgnetwork.com/lfm2cfmcalc.html>, que permitió calcular el flujo de aire por unidad de volumen expresado en CFM, equivalente a (m^3/s). Para encontrar este valor se introdujeron los datos en el simulador teniendo

| Característica | Unidad | Resultado |
|--------------------------------------------------|-------------------|------------------------|
| Rangos de presión mínimos de trabajo | | |
| Presión inicial del sistema (p_o) | kPa | 6,86 |
| Perdidas mayores (H_L) | kPa | 0,0070 |
| ΔP (difusor) | kPa | 2,05 |
| Rango de Presión del sistema calculada (P_f) | kPa | 2.064 a 6.885 |
| Potencia de trabajo | | |
| Caudal teórico calculado | m ³ /s | 5.8×10^{-5} |
| Velocidad del gas | m/s | 1.318×10^{-4} |
| Potencia volumétrica | W/m ³ | 4.95×10^{-4} |

Cuadro 3. Presión y cálculos del compresor.

en cuenta la consideración de geometrías tubulares, donde un tubo contiene el líquido y otro el flujo de gas; además, se especificaron como condiciones iniciales los diámetros del *riser* y del *downcomer*, correspondientes a los valores de 0,109 m y 0,076 cm respectivamente y un flujo de entrada al compresor de 1,50 m/s. Con estos datos se obtuvo un caudal de entrada de 0,012 m³/s. También, con el fin de asegurar que la cantidad de aire en el sistema fuera la correcta, se realizó el cálculo del caudal en un punto intermedio donde el aire hace contacto con el difusor para homogenizar el flujo, especificando en el simulador la altura del difusor de 0,05 m y el diámetro de cada orificio igual a 0,003 m para obtener un caudal de mezcla, en ese punto intermedio, de $2,02 \times 10^{-4}$ m³/s.

Conociendo los resultados teóricos de los caudales se calculó el número de orificios aproximados ajustando mediante una función objetivo el diámetro exacto de los orificios y reemplazando los valores en las ecuaciones (21) a (24) se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 4:

| Parámetro | Unidad | Descripción | Resultado |
|------------|-------------------|------------------------|-----------|
| ΔP | kPa | Delta de presión | 2,05 |
| Cd_{or} | adimensional | Coficiente de descarga | 0,11 |
| Q_o | m ³ /s | Caudal del orificio | 5 |
| N_o | adimensional | Numero de orificios | 99,99 |

Cuadro 4. Resultados cálculo de orificios.

Iluminación. Se seleccionaron las tiras de led como fuente luminosa. En el cuadro 5 se resumen los resultados del análisis de los conceptos de iluminación. Esto se realizó teniendo en cuenta el efecto de la irradiación e iluminancia máxima, así como también el requerimiento cuántico (fotones), parámetros que describen la intensidad lumínica y la cuantificación de la cantidad de luz emitida y absorbida por el cultivo; determinando de esta manera la cantidad de energía útil que hace referencia a la energía capaz de inducir el proceso fotosintético.

| Unidades | Valor | Resultado |
|----------------------------|---------|-----------|
| W/m ² a fotones | 3,02 | 14496 |
| Fotones a lux | 14496 | 478368 |
| Fotones a lux | 57984 | 1993,72 |
| Lux a fotones | 1445,45 | 4336,4 |

Cuadro 5. Variables analíticos de fotones.

3.3. Condiciones de operación

Sistemas de control y transmisión de datos. El sistema de control está diseñado para permitir la transmisión de los datos registrados por este y su posterior visualización en un ordenador de forma gráfica para observar en tiempo real el comportamiento de las variables y la desviación presentada con relación al punto de referencia o *set point*. Las variables en las figuras 3, 4 y 5 se identifican con la línea inferior roja y el punto de referencia con la línea superior amarilla.

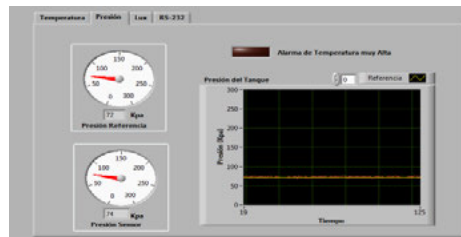


Figura 3. Presión.

Ajuste de rangos de operación. Se realizó interpretando los comportamientos de las variables gráficamente, como se muestra en las figuras 6, 7, 8 y 9 en las

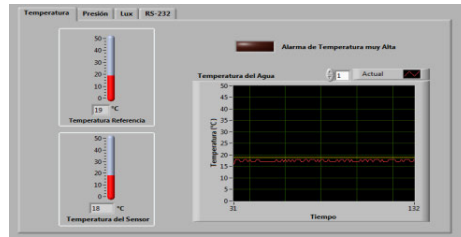


Figura 4. Temperatura.

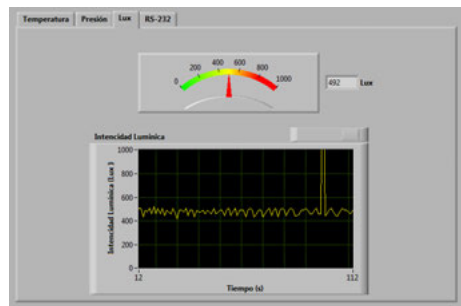


Figura 5. Intensidad lumínica.

cuales se ilustran comportamientos de la temperatura y la presión comparadas con el control, junto con el registro de los datos a lo largo del tiempo de operación del FBR. Después, se registraron los datos del sistema de estudio en funcionamiento, tomando para cada uno la medida de desviación estándar, con el fin de obtener los datos con menor valor.

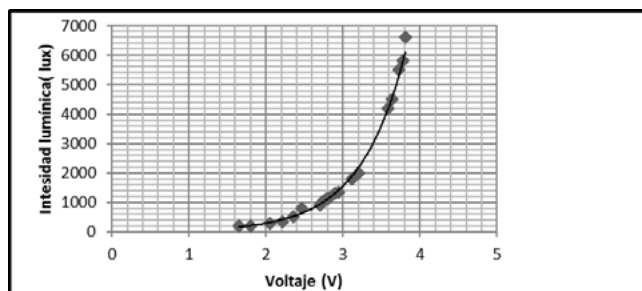


Figura 6. Curva de comportamiento de intensidad lumínica.

Como lo indica la figura 6 el comportamiento de la intensidad lumínica es exponencial, y cubre el rango de trabajo de los [0- 6000 lux]. Para la interpretación adecuada por parte de los instrumentos de medición fue necesario realizar un ajuste lineal del comportamiento entre [0-2000 lux] [1], como se ve en la figura 7.

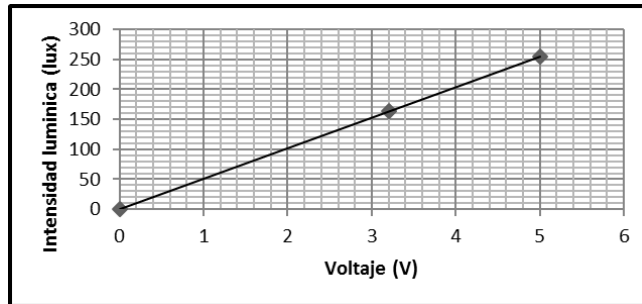


Figura 7. Ajuste lineal de la intensidad lumínica.

Conociendo el rango de trabajo se extrapolaron los datos y se calcularon los resultados de la desviación estándar. Con base en esto, se identificó el intervalo de menor valor correspondiente a [0,68 a 2,91] y equivalente al rango lumínico de [1300-2000 lux], rango confiable de operación.

El comportamiento de la temperatura y presión es lineal como se observa en las figuras 8 y 8. Para la primera, el rango programado está contemplado entre los [0-50 °C] cubriendo el rango de crecimiento microalgal descrito en la anterior sección, y el de operación está dado por el intervalo de menor valor de desviación, correspondiente a [0,203 a 0,199], equivalente al rango de [18 a 27 °C]. Para la segunda, se estableció un rango continuo entre [0-700 kPa] con un valor de desviación [3,008 a 19,806], el cual cubre la presión de operación entre [0-200 kPa].

3.4. Discusión de resultados

Materiales. La selección de este material tuvo lugar al analizar los criterios de selección descritos en la anterior sección sobre las propiedades de los mismos. Según [16] la densidad del material afecta la resistencia de éste de manera inversamente proporcional; de esta forma, si la densidad aumenta la resistencia del material disminuye y viceversa. A su vez, la resistencia también depende del espesor, es este el que determina el contenido energético que puede retener el material en sus paredes, también conocida como energía retenida de pared. Dicha energía se relaciona simultáneamente con la conductividad térmica del material. Así, entre más delgado sea éste, mayor resistencia, menor la energía retenida y la conductividad térmica, lo cual permite controlar la acumulación de calor por

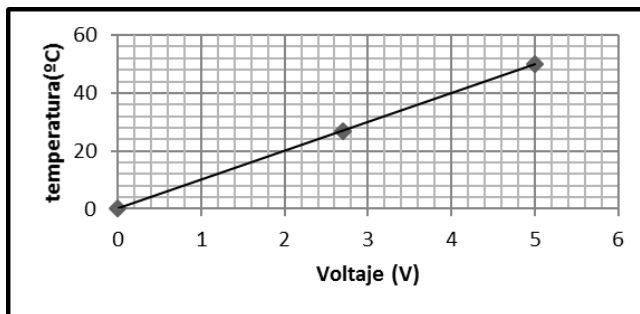


Figura 8. Curva de comportamiento de temperatura.

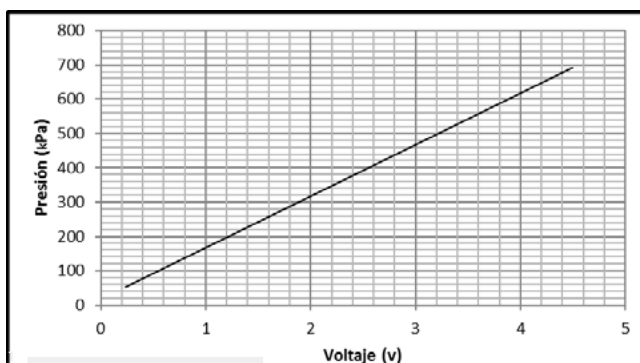


Figura 9. Curva de comportamiento de presión.

conducción del material hacia el cultivo, previniendo un aumento indirecto de la temperatura.

Conocer dicho efecto fue un criterio cualitativo a la hora de seleccionar el material, pues, al comparar los tres materiales anteriormente mencionados en el cuadro 1, se observa que el vidrio flotado posee una mayor densidad comparado con el acrílico y polietileno respectivamente; por tanto, su resistencia al impacto es menor, haciéndolo un material susceptible a la ruptura, a pesar de que posee una energía retenida baja con espesores pequeños.

Contrario a esto, el polietileno y el acrílico rígido tienen densidades más bajas, con mayor resistencia mecánica; sin embargo, la energía retenida por las paredes es variable debido a la facilidad que tienen dichos materiales para ser manejados en diversos espesores adaptados a las condiciones de trabajo del fabricante y diseñador.

Por otro lado, el espesor influye en la transmisión de luz en el material y entre menor sea este mayor es dicha transmisión; con esto se asegura que se suplan las necesidades lumínicas de las microalgas para sobrevivir. Así, una reducción

de ésta última, afecta directamente al crecimiento microalgal y por ende a la producción de biomasa.

Siendo consecuente, puede verse que el acrílico con las características mencionadas en la sección anterior, cumple con los requerimientos porque, a pesar de su costo, posee baja energía retenida, alta resistencia mecánica, baja densidad, amplio tiempo de vida útil en espesores pequeños (aproximadamente tres milímetros), efecto no tóxico sobre el medio de cultivo, buena disponibilidad y aplicabilidad para la construcción de FBRs. Todo esto, hace de éste un material atractivo para la construcción del equipo seleccionado, como también lo habían expresado en [4].

Dimensiones. Se escogieron las combinaciones dispuestas en secciones anteriores porque se ajustan coherentemente a las condiciones adecuadas que se describen a continuación con el fin de mejorar la producción de biomasa.

El diseño adecuado del FBR tuvo en cuenta el efecto de las dimensiones del equipo sobre las condiciones óptimas del medio de cultivo, en especial los diámetros del *riser* y *downcomer* con la relación de área de transferencia, porque a partir de esta relación, se puede dar una buena distribución de aire, permitiendo la producción eficiente de biomasa dentro del fotobiorreactor.

En cuanto a la producción de biomasa tiene una relación inversamente proporcional con estos, así a diámetros menores, mayores cantidades de biomasa, y viceversa. Además, la relación del área debe tener un valor $A_r/A_d \approx 1$. La acumulación de biomasa aumenta a medida que dicho valor se acerca al valor más alto o crítico (VC), en $A_r/A_d = 0.8$, por lo cual el área que mejor se adecua es la presentada por el cuarto diseño, pues su valor de 0.41 se encuentra en un rango promedio menor que el valor crítico. [30]

Otro punto importante del diseño es la altura del *riser* y del *downcomer*, porque afecta las células por la trayectoria de ascenso y descenso; también incide sobre el tiempo de retención en cada una de las zonas del equipo, si las dimensiones son muy altas pueden ocasionar un periodo prolongado en un trayecto oscuro, causando un aumento en el estrés celular por las fuerzas de corte y así, se reduce el crecimiento microalgal. [30].

Sistema de agitación. El compresor, se seleccionó de tipo centrífugo ya que este puede operar a un flujo constante y homogéneo proporcionando caudales bajos en un rango de los límites, donde el caudal de entrada alimentado en el fondo del equipo, debe tomar como mínimo valores dentro del rango de $[5,6 \times 10^{-5}$ a $7,07 \times 10^{-5}]$ m³/s. Para el caudal de mezclado en el difusor los valores de diseño preliminar para un diámetro de 9 pulgadas puede pensarse en el rango $[6,1 \times 10^{-4}$ a $7,07 \times 10^{-4}]$ m³/s. Sin embargo, en el equipo construido este diámetro se tomó como 0,0762 m, con el fin de preservar la relación adecuada entre diámetros y alturas que permite la correcta distribución de aire dentro del FBR, y como consecuencia de esta reducción de dimensiones, el caudal también lo hace de manera proporcional, tomando valores dentro del intervalo $[1,41 \times 10^{-4}$ a $2,3 \times 10^{-4}]$ m³/s.

El ajuste de los caudales en el equipo se logró considerando en primera medida el análisis de la potencia volumétrica requerida por el equipo, que representa una relación entre el caudal real y el caudal teórico o de operación del fluido; esto permite garantizar que la agitación alcanzada en el medio de cultivo es buena causando una mezcla continua. A continuación, se realizó el análisis del difusor tubular en cuanto a número de orificios y el diámetro de estos, y se encontró un valor de aproximado de 100 orificios con un diámetro correspondiente a 3 mm cada uno, ocasionando velocidades y caudales bajos, condiciones que coinciden con lo expresado en [25], donde se describe que “a diámetros mayores a 1 mm se alcanzan velocidades bajas haciendo mayor el flujo de burbujas”.

Sistema de iluminación. La fuente más acertada para cumplir los requerimientos lumínicos de las microalgas son los leds. Gracias a su estructura permiten una mejor intensidad de la luz, a una longitud de onda aproximada de 623 nm. Esta longitud, está incluida dentro del intervalo de longitudes de onda responsables de la excitación de la clorofila de la *Chlorella Vulgaris*: desde 380-400 nm hasta 600-670 nm [14]. Además, los leds poseen una buena durabilidad a través del tiempo.

Los resultados de los parámetros de iluminación obtenidos son adecuados y suplen las necesidades lumínicas necesarias para el crecimiento microalgal, porque proporcionan un buen rendimiento en la conversión de energía lumínica que incide en la fotosíntesis. Se observa que la cantidad de intensidad empleada genera 14,496 fotones, cantidad coherente con lo referenciado en la literatura [13] donde se dice que son necesarios cerca de “16 pares de fotones para suplir las necesidades de luz o requerimiento cuántico que facilitan la reducción de las moléculas de CO₂.”

También, se analizaron los fotones y los luxes totales producidos por todo el sistema de iluminación (cuatro tiras de led), el cual genera 1993,47 lux/m², valor aproximado a los 2000 lux/m², intensidad de luz requerida por la microalga.

Por último, se calculó la iluminancia máxima para encontrar la densidad de fotones requerida, cumpliendo con los requerimientos mínimos teóricos de operación del reactor. Sin embargo, es de resaltar que la recepción de fotones y la densidad de estos es variable de acuerdo con las condiciones ambientales en las cuales se encuentra sometida la microalga, variando entre 10 y 12 fotones, según [3].

Otro punto importante de discusión es la iluminación en el equipo, como se dijo en secciones anteriores dada por un sistema lumínico principal que es la luz natural y un sistema secundario que son las cintas de led. Se tiene en cuenta la luz natural como fuente lumínica principal debido al diseño del FBR, porque fabricado en un material totalmente transparente permite que todo el volumen del equipo este expuesto a la iluminación, y por ende el único factor que influye en la disminución de dicha exposición, es el autosombreo causado por el aumento en la densidad del cultivo y en una menor proporción a la ubicación del FBR.

Sistemas de control y ajustes de operación. De las figuras 3, 4 y 5, se pudo observar que tanto la presión como la temperatura tuvieron un rango de desviación muy pequeño con relación al punto de referencia. El comportamiento de la intensidad lumínica se mantuvo dentro de los rangos especificados. Además, los resultados obtenidos por las figuras 6, 7, 8 y 9 y los valores de las desviaciones indican que las variables se mantuvieron en los niveles adecuados para permitir el crecimiento microalgal. Sin embargo, la presión es la única variable en la que no se especificó un rango de operación fijo, ya que esta está limitada por las condiciones, velocidades, y tiempos de operación a las cuales se generan las reacciones biológicas, estas determinan directamente los niveles de gases dentro del reactor y por ende en la presión generada, conduciendo a que ésta sea inestable aumentando o disminuyendo a lo largo del tiempo.

4. Conclusiones

Las variables principales de diseño analizadas son coherentes con respecto a las bases teóricas con las que fueron comparadas para su elaboración. Igualmente, los sistemas de control implementados en el FBR presentaron un buen funcionamiento, porque facilitaron la estabilización de las variables en el medio de cultivo. Sin embargo, se recomienda ajustar los puntos de comparación en cada intervalo de operación pues, al tratarse de reacciones biológicas estas son únicas de acuerdo a las condiciones fisiológicas de la especie a trabajar.

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a todas las personas y entidades que colaboraron con la realización de este trabajo, que ayudaron a que poco a poco este proyecto se convirtiera en una idea tangible.

Referencias

1. Albalde J.: Microalgas. Cultivo y aplicaciones. Universidad De La Coruña. P. 9. (2003).
2. Ashby, Michael F. & Jones, David.: Materiales para ingeniería. 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Editorial Reverte. S.A. Barcelona, España. P. 4-13. (2008)
3. Berguillos, Fernando.: Tesis doctoral: cultivo en biorreactores de *rhodospirillumrubrum* en condiciones fotoheterotróficas. Universidad Autónoma de Barcelona. P.296. (2007)
4. Burgess, Greg. Fernandez - Velasco, Javier: Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production. En: International Journal Of Hydrogen Energy. Australia. P.1228. (2007).
5. Carvalho, Ana. Meireles, Luis., Malcata, Xavier: Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. En: Biotechnology Review. Portugal. Vol. 22, No. 6 (Jul - Dic. 2006); P.1490. (2006).

6. Converti, Attilio, Casazza, Alessandro A., Ortiz, Erika Y., Perego, Patrizia, Del Borghi, Marco: Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *nannochloropsis oculata* and *chlorella vulgaris* for biodiesel production. En: Chemical Engineering and Processing. Vol., 48, No. 6 (Jun, 2009); P. 1146-1151. (2009).
7. Coral Contreras- Florez, Julian Mario: Avances en el diseño conceptual para el cultivo de microalgas. Revista Interciencia, Agosto 2003, Vol 28 N 8. (2003).
8. D. Qureshi.: Principios de fluidización: capítulo 3. Ed. Pellgeldart. P.24-25. (2010).
9. Diaz Cortes, Vanessa y Ordoñez Ovalle, Camilo: Evaluación del ph y la agitación del medio adecuado para el crecimiento de *duanadiella salina* en condiciones de laboratorio. Bogotá D.C., 2006. Trabajo de grado para optar al título de microbiólogo industrial. Universidad Pontificia Javeriana. Facultad de Ciencias. Carrera de Microbiología Industrial. P. 26. (2006).
10. Durand, Alejandro: Escalamiento el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Tecnología Ciencia. México, Ed. (IMIQ), 23 (1). P.31-39 (2008).
11. Gases comprimidos, Riesgos. Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional: <http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/compressed/compress.html>
12. Huerfano Delgado, David.: Diseño y simulación de un reactor *airlift* para la producción de alcohol etílico con *saccharomyces cerevisiae* utilizando *solanum tuberosum*. Fundación Universidad de América. P. 37 A 42. (2009).
13. Javanmardian and Palsson.: High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system. En: Biotechnology And Bioengineering, Vol. 38, No.2
14. Kommareddy, Anil.: Study of light as a parameter in the growth of algae in a photobio reactor (pbr). (034057, 07, And (2003): Las Vegas, USA). En: Asae Meeting Presentation. Annual International Meeting: Riviera Hotel And Convention Center, Nevada: 2003. P.12. (2003).
15. Kochem, Luce Helena: Caracterización de un fotobiorreactor tipo *airlift* para el cultivo de microalgas. Universidad Federal de Rio Grande. Porto Alegre. P. 22. (2010).
16. Márquez, Ronald.: Materiales de ingeniería química. Selección de materiales en plantas químicas y para diseño de productos. Capítulo 10. P.133. (2010) .
17. M.Y Chisti.: Airlift Bioreactor. London: Elsevier. Capitulo 3, P.350. (1989).
18. Merchuk, José.: Bioreactor, Airlift Reactors. En: Encyclopedia Of Bioprocess Technology. 15, Octubre 2012 P. 320
19. Montengro, Luis.: Conferencia: “Microalgas, Cultivo e Industria”. Instituto de Ciencias Naturales de La Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá). Octubre de 2012. (2012).
20. Mott, Robert.: Mecánica de fluidos. México: Pearson Education, Sexta Edición. 2006. P. 501. (2006).
21. Navegadores de Java Script. Lfm to Cfm calculator. [Aplicación Informática, en línea]. Disponible En Internet: <http://www.csgnetwork.com/lfm2cfmcalc.html>.
22. Posten, Clemens.: Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. En: Engineering In Life Sciences Volumen 9, 3a. Edición, P 165-177. (2009).
23. Such, Soo Y Lee Choun-Gyun.: Photobioreator Engineering: Design And Performance. En: Revista de Biotecnología e Ingeniería de los Bioprocesos, 2008, N8, P 313-321. (2008).
24. Torres, Diana Mireya.: Diseño y simulación de un fotobiorreactor para la producción de hidrógeno a escala piloto. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C.

- Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. 2005. 121p. (2005).
25. Y. T. Shah, B. G. Kelkar.: Journal Review. Design parameters estimations for burble, column reactors. University Of Plynrburgh. Vol. 28, No 3.(May, 1982); P. 355. (1982) .
 26. Acrílicos Norglas. [en línea]. [Uruguay]. Disponible en http://www.norglas.cl/catalogo/productos_detalle.php?codigo=530. [citado 8 Noviembre 2012]
 27. Anónimo. Propiedades del polietileno; [en línea]. 25 Agosto de 2005. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades> [citado 4 mayo 2012]
 28. Código técnico de la edificación Web. [en línea]. Disponible En: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=23>. [Citado 4 mayo 2012] (2007).
 29. Nag Dasgupta, Chitralkha y otros.: Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. En: International Journal Of Hydrogen Energy. Vol., 35. No 19 P. 10227. (2012).
 30. Merchuk, José.: Airlift Bioreactors: Review Of Recent Advances. Department of Chemical Engineering. Ben-Gurion University of The Negev. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volumen 81, Junio - Agosto, P.334, 335. (2003).



Caracterización fisicoquímica del sistema Mo/CuInS₂/Zn(O,OH)S/ZnO por medio de espectroscopía fotoelectrónica XPS y AES

William A. Vallejo^{1*}, Carlos E. Diaz-Uribe¹, Mikel Hurtado²

¹ Grupo de Investigación en Fotoquímica y Fotobiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad del Atlántico. Kilómetro 7 Vía Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia

² Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar. Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.

FECHA DE ENTREGA: 10 DE ABRIL DE 2014

FECHA DE EVALUACIÓN: 25 DE ABRIL DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 10 DE MAYO DE 2014

Resumen Las técnicas de espectroscopía en volumen y superficie son métodos analíticos muy confiables para realizar la caracterización de películas delgadas de diferentes materiales; en este trabajo se presentan resultados relacionados con la composición de la capa absorbente (CuInS₂) y la capa *buffer* Zn(O,OH)S en el sistema Mo/CuInS₂/Zn(O,OH)S/ZnO. Las capas de CuInS₂ y ZnS fueron sintetizadas por co-evaporación y deposición de baño químico (CBD) respectivamente, el sistema fue caracterizado por medio de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) y todo el sistema fue estudiado por medio de espectroscopía electrónica Auger (AES). Los resultados de XPS indicaron que la capa *buffer* cubrió uniformemente la superficie de CuInS₂, además se verificó que la capa *buffer* esta compuesta por una mezcla de diferentes compuestos. Finalmente la caracterización por AES en profundidad permitió determinar la composición de cada una de las películas del sistema fotovoltaico.

Abstract Volume and surface spectroscopy techniques are reliable analytical methods to characterize thin films of different materials. This paper presents results related to the composition of the absorbing film (CuInS₂) and the Zn(O,OH)S buffer film within the Mo/CuInS₂/Zn(O,OH)S/ZnO system. CuInS₂ and ZnS films were synthesized per co-evaporation and chemical bath deposition (CBD) respectively. The system was characterized through an X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and studied through the Auger electron spectroscopy (AES). The results of the XPS indicated that the buffer film covered uniformly the CuInS₂ surface, and we were able to verify that this film is created by a mixture of different compounds. Finally, the AES characterization allowed us to determine the composition of each one of the films of the photovoltaic system.

Palabras Clave: espectroscopía, CuInS₂, voltaje, películas delgadas, celdas solares.

Keywords: spectroscopy, CuInS₂, voltage, thin films, solar cells.

* williamvallejo@mail.uniatlantico.edu.co

1. Introducción

Las celdas solares de película delgada que utilizan capas absorbentes tipo calcopirita (CuInS_2 , CuGaSe , Cu(InGa)(SeS)_2) actualmente tienen una eficiencia máxima de conversión de 20.1% a escala laboratorio [1]. Este tipo de celdas utilizan una película delgada de CdS (50-80 nm) en su estructura; esto con el fin de mejorar el acople mecánico entre la capa absorbente y el contacto eléctrico superior; sin embargo este material presenta dos inconvenientes importantes: (a) la elevada toxicidad del CdS presenta riesgos ambientales durante la fabricación de los recubrimientos; (b) este material presenta una brecha de energía prohibida pequeña ($E_g = 2.4$ eV); esto ocasiona que se presenten pérdidas de fotocorriente en longitudes de onda cercanas a la región ultravioleta [2,3,4]. En la actualidad fabricar capas *buffer* libres de Cd que permitan obtener eficiencias elevadas y que no deterioren la estabilidad de la celda solar es uno de los principales temas de investigación en el área [5]. El Zn(O,OH)S es uno de los principales candidatos para obtener capas *buffer* libres de Cd con eficiencias comparables; esta capa tiene una E_g de 3.8 eV y no presenta ningún riesgo ambiental. El método *Chemical Bath Deposition* (CBD) ó deposición de baño químico (en español) ha sido ampliamente utilizado para la síntesis de las películas *buffer* debido a su bajo costo de implementación, las temperaturas de síntesis son bajas, y este método permite recubrir con facilidad grandes superficies sin deteriorar la capa absorbente [6], actualmente las celdas solares que utilizan capas *buffer* de Zn(O,OH)S sintetizadas por CBD han presentado eficiencias 18.8% [7] muy cercanas a las máximas reportadas cuando se utiliza el CdS, la incorporación de este tipo de capas *buffer* en remplazo de las capas de CdS sin disminuir significativamente la eficiencia del sistema fotovoltaico representa un avance significativo en el área. En este trabajo se sintetizaron capas de Zn(O,OH)S sobre capas absorbentes de CuInS_2 , como remplazo de la tóxica y ambientalmente peligrosa capa *buffer* de CdS.

2. Experimental

El sistema con la estructura Mo/CIS/ Zn(O,OH)S / ZnO fue construido utilizando el siguiente procedimiento: como contacto eléctrico inferior de la celda se utilizó una película de Mo con un espesor de 1.1 μm ; esta capa fue sintetizada utilizando un sistema de sputtering magnetrón DC con una configuración de electrodo tipo S-gun [8]. La capa absorbente CIS con 1 μm de espesor fue sintetizada por medio de coevaporación de In y Cu en una atmósfera de S utilizando un proceso de tres etapas [9]. Como capa *buffer* se utilizó una película de Zn(O,OH)S de 80 nm de espesor; esta fue sintetizada por el método CBD, para tal efecto se utilizaron tiourea y acetato de zinc como precursores; también se utilizó citrato de sodio y amoníaco como complejantes y soluciones tampón; el proceso fue realizado a pH 10.5 y 80 °C; el tiempo de síntesis fue evaluado entre 15-60 minutos [10]. Finalmente como contacto eléctrico superior se utilizó una película de ZnO con 1 μm de espesor; esta capa fue sintetizada por medio de evaporación reactiva [11].

Con el fin de caracterizar la capa absorbente y la capa *buffer* diferentes muestras fueron estudiadas por medio de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) y espectroscopía electrónica Auger (AES) en superficie y en profundidad utilizando un espectroscopio Perkin-Elmer ESCA/SAM modelo 560. La espectroscopía Auger fue utilizada para caracterizar toda la celda solar en un perfil de profundidad; la erosión de las muestras se hizo con un cañón de iones Ar^+ , irradiando la muestra con un haz de electrones (2 KeV) y una densidad de corriente de $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. La estructura de toda la celda solar fue analizada por medio de microscopía de barrido electrónico (SEM) en sección transversal con un área de barrido de ($2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$), utilizando un microscopio Cambridge S360 operado con un voltaje de aceleración de 20 KV.

3. Resultados

3.1. Espectroscopía XPS

La figura 1 muestra el perfil de XPS típico de una muestra de CIS. El perfil muestra las señales características de energía de enlace para los átomos de Cu, In y S presentes en esta capa absorbente. Las dos primeras señales ubicadas en 952.0 eV y en 932.0 eV corresponden a las transiciones electrónicas del Cu $2p_{1/2}$ y el Cu $2p_{3/2}$ respectivamente; estas energías de enlace corroboran la presencia del ión Cu^+ . Las señales características del ión In^{3+} aparecen a menores valores de energía de enlace en 665.5 eV, 452 eV, 444 eV y 17.9 eV; estas señales corresponden a transiciones electrónicas del In $3p_{3/2}$, In $3d_{3/2}$, In $3d_{5/2}$ y In $4d_{3/2}$ respectivamente.

El espectro de XPS también muestra señales correspondientes al ión S^{2-} ; en 226.0 eV y 162.0 eV; estas señales corresponden a las transiciones S $2s$ y S $2p_{3/2}$. Todas las señales corroboran las valencias de los átomos constituyentes de las películas de CIS. En el espectrograma de XPS se pueden observar algunas transiciones Auger, en este caso se encuentran señales en 569.3 eV y 534.12 eV correspondientes a la transición Auger del Cu $L_3M_{45}M_{45}$ típicas de compuestos tipo calcopirita; estos resultados concuerdan otros reportes [12]. La figura 1 también muestra el perfil de profundidad de la misma capa; el proceso de erosión de la superficie fue realizado hasta alcanzar 400 nm de profundidad. El perfil obtenido después de ocho minutos de *sputtering* muestra que la intensidad de las señales correspondientes a las foto-transiciones del ión Cu^+ aumentan su intensidad, este incremento indica que la superficie del CIS presenta deficiencia de Cu; esto es resultado del proceso de obtención de la capa CIS ya que en el último paso de síntesis se obtiene la calcopirita en una atmósfera rica en In; esto se hace con el fin de evitar la formación de Cu_2S en la superficie del recubrimiento. Por otra parte, la señal ubicada en 286 eV corresponde a la transición electrónica del C $1s$; es común encontrar esta señal debido a contaminación con CO_2 atmosférico adsorbido en la muestra analizada [13].

La figura 2 muestra el perfil típico de una película de $\text{Zn}(\text{O},\text{OH})\text{S}$ obtenida por CBD después de 45 minutos de síntesis por CBD y el perfil de la capa

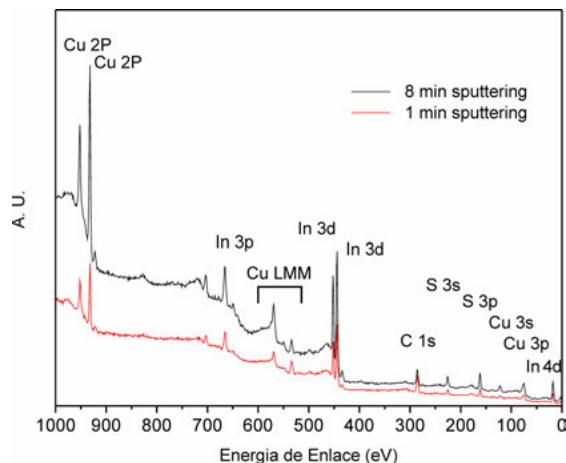


Figura 1. Perfiles de XPS correspondientes a estudio en superficie y en profundidad de la película de CIS.

de CIS utilizada como sustrato. Se pueden observar las señales características para átomos de Zn S y O. El espectro muestra cuatro señales características del ión de Zn^{2+} ubicadas en 10.8 eV, 89.5 eV, 139.8 eV, 1021.8 eV y 1196.5 eV, estas corresponden a las transiciones electrónicas del $Zn 3d$, $3p_{3/2}$, $3s$, $2p_{3/2}$ y $2s$ respectivamente; la presencia de estas señales, corroboran la presencia del ión Zn^{2+} . El espectro XPS muestra algunas transiciones Auger en el rango de 480 eV y 690 eV correspondientes a las transiciones $Zn L_3M_{45}M_{45}$.

La figura 2 también muestra dos señales en 162.2 eV y 226.2 eV propias de las transiciones electrónicas de S $2p$ y S $2s$ del ión S^{2-} . El espectro de XPS también muestra dos señales importantes ubicadas en 530.2 eV correspondientes a la fototransición de O $1s$, la presencia de esta señal sugiere la formación de $Zn(OH)_2$ y/o ZnO dentro de la capa *buffer*. El posible mecanismo de generación y crecimiento de la película sugiere la formación de $Zn(OH)_2$ [14], sin embargo debido a que la espectroscopía de XPS no permite identificar iones H^+ no es posible comprobar la presencia de este ión en la capa *buffer*; pero la formación de $Zn(OH)_2$ y/o ZnO no es eliminada completamente del medio de reacción a pesar de que las condiciones de síntesis (baja concentración del ión metálico y la adición del acomplejante) favorecen la formación de ZnS [15]. Todo lo anterior sugiere que la capa *buffer* sintetizada es una mezcla de ZnS, $Zn(OH)_2$ y ZnO; comúnmente referenciado como $(Zn(O,OH)S)$ esto concuerda con lo reportado por otros autores [16].

3.2. Espectroscopia AES

La figura 3 muestra el perfil de composición atómica en profundidad de la celda solar con estructura Mo/CIS/ $Zn(O,OH)S$ /ZnO; obtenido por AES. El

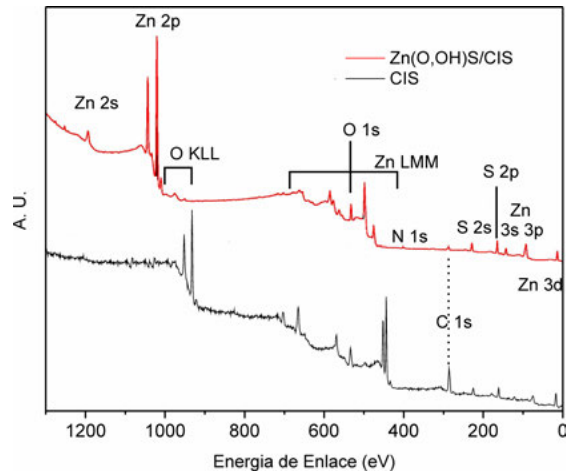


Figura 2. Perfiles de XPS de una capa de ZnS y la capa de CIS.

perfil permitió determinar la composición atómica de las diferentes capas que constituyen la celda solar. Durante los primeros ocho minutos de *sputtering* se mantiene constante la composición de Zn (49%) y O (42%) correspondiente a la película de ZnO. La composición de esta capa no es exactamente 50%-50% porque durante la síntesis del ZnO se generan vacancias de oxígeno (inducidas) dentro del material para favorecer la conductividad del material. Para un tiempo de *sputtering* entre 8-10 minutos se observa la transición a través de la capa *buffer*; esta transición es bastante uniforme y no se evidencian señales correspondientes a cambios considerables en la composición de S, O y Zn durante el *sputtering* de la capa *buffer*; este resultado es muy significativo ya que muestra que en la interfase entre la capa absorbente y el ZnO no hay gradientes de concentración de materiales que puedan deteriorar el funcionamiento de todo el sistema.

La zona correspondiente a la capa CIS (tiempo de *sputtering* 10-22 min) muestra que la composición es bastante uniforme; esto corrobora los resultados obtenidos por XPS; además se pone en evidencia la posible difusión de iones a través de esta capa. La figura 3 muestra un contenido de Zn cercano al 10% en esta zona; es posible que durante el proceso de síntesis de la capa *buffer* se haya facilitado el proceso de interdifusión de iones Zn^{2+} desde la capa *buffer* hacia la capa absorbente. Este tipo de comportamientos ya ha sido reportado para recubrimientos de CdS [17] el reducido tamaño de los iones de Zn^{2+} y la presencia de vacancias en la estructura del CIS favorecen la interdifusión de los iones de Zn^{2+} durante la formación de la capa *buffer* y durante su almacenamiento. Para un tiempo de *sputtering* superior a 22 minutos se alcanza el recubrimiento de Mo; para este tiempo de *sputtering* se observa un contenido elevado de azufre (10%) y oxígeno (20%). Al respecto se conoce que debido a las condiciones de almacenamiento y tratamiento de la muestra durante la fabricación de cada

recubrimiento, es posible que oxígeno adsorbido en la superficie pueda difundir entre los límites de grano dentro de los cristales que componen la película de Mo; estos sitios presentan una elevada disposición para almacenar oxígeno y formar MoO_3 [18], además durante la síntesis de la capa CIS se favorece la formación de MoS_2 en la interfase de los dos materiales.

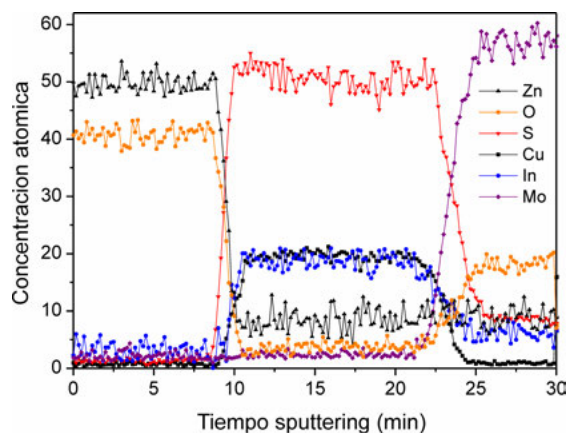


Figura 3. Perfiles de AES de la celda solar con estructura Mo/CIS/ZnS/ZnO.

4. Conclusiones

Se caracterizó fisicoquímicamente el sistema Mo/CuInS₂/Zn(O,OH)S/ZnO por medio de espectroscopia XPS y AES. El análisis de XPS indicó que la capa CIS presenta deficiencia de S ocasionado por el proceso de síntesis; además el análisis de XPS indicó que la capa *buffer* sintetizada está compuesta por una mezcla de ZnS, Zn(OH)₂ y ZnO. Finalmente el análisis AES indicó que durante el almacenamiento el O_{2(g)} de la atmósfera pueda difundir entre los límites de grano dentro de los cristales que componen la película de Mo generando la formación de MoO_3 . Finalmente por medio de espectroscopia AES fue posible determinar la composición de cada una de las películas que conforman el sistema fotovoltaico.

Referencias

1. Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.: Progress in Photo-voltaics: Research and Applications, 21:5, 827-837. (2013)
2. Seo H., Ok E., Kim W., Park J., Seong T., Lee D., Cho H. Y., Jeong J.: Thin Solid Films 546 289-293. (2013)

3. Pérez-Hernández G., Pantoja-Enríquez J., Escobar-Morales B., Martínez-Hernández D., Díaz-Flores L.L., Ricardez-Jiménez C., Mathews N.R., Mathew X.: *Thin Solid Films* 535 154-157. (2013)
4. Gaubas E., Brytavskiy I., Ceponis T., Kusakovskij J., Tamulaitis G.: *Thin Solid Films* 531 131-136. (2013)
5. Vallejo W., Hurtado M., Gordillo G.: *Electrochimica Acta* 55 5610-5616. (2010)
6. Vallejo W., Clavijo J., Gordillo G.: *Brazilian Journal of Physics*, vol. 40, no. 1, March, 2010, 30-37. (2010)
7. Contreras M.A., Nakada T., Hongo M., Pudov O. A., Sites J. R.: 3rd World Conference on Photovoltaics Energy Conversion, Osaka. Japan, 2003, 98. (2003)
8. Gordillo G., Mesa F., Calderon C.: *Brazilian Journal of Physics*, 36, 982. (2006)
9. Calderón C., Pérez P., Clavijo J., Oyola J. S., Gordillo G.: *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94, 17. (2010)
10. Vallejo W., Romero E., Gordillo G.: *Proc. 33th IEEE Photovoltaic Solar Energy Conference*, San Diego, USA, 2008, 153. (2008)
11. Gordillo G., Calderon C.: *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 69, 251. (2001)
12. M.S. Park: *Current Applied Physics*, doi:10.1016/j.cap. 2010.02.17. (2010)
13. Bartolo-Perez P., Peña J. L.: *Revista Mexicana de Física*, 44, 9. (1998)
14. Hodes G.: *Chemical Solution Deposition of semiconductor films*, Marcel Dekker, Inc. New York, 120. (2002)
15. Sankapal B. R., Sartale S. D., Enaoui A.: *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83, 447. (2004)
16. O'Brein P., McAleese J.: *Journal of Materials Chemistry*, 2309. (1998)
17. Abou-Ras D.: *Thin Solid Films*, 480, 118. (2005)
18. Al-Thani H., Young M., Asher S., Hasoon F.: 4th World Conference on Photovoltaics Energy Conversion, shanghai, China (2006).

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), 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: ednorman@poligran.edu.co, elementos@poli.edu.co.

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.
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 researches 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, researches, entrepreneurs, external researches (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). 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: ednorman@poligran.edu.co, elementos@poli.edu.co.

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 L^AT_EX 2_ε 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.
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)

OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA QUE MINIMIZA EL IMPACTO DE UN PARACHOQUE CONTRA UN OBJETO

ROGELIO ALVARADO, MIGUEL ANGEL BERNAL, JOSÉ RAFAEL NARVÁEZ, CÉSAR AUGUSTO QUIÑONES

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL ACEITE ESENCIAL E IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE LA ESPECIE RAPUTIA HEPTAPHYLLA (RUTACEAE)

CARLOS ANDRÉS COY BARRERA, JORGE PARRA, LUIS ENRIQUE CUCA SUÁREZ

ESTUDIO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO EN HELICÓPTEROS MILITARES MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL COSTEO ABC

MARIO JAVIER GIRALDO, DIANA PAOLA TAPIERO PAREDES, MÓNICA GARCÍA CASTILLO

COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCTIVIDAD EN EMPRESAS DEL CLUSTER PLÁSTICOS ESTABLECIDAS EN BOGOTÁ D.C. DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE ENVASES, EMPAQUES Y EMBALAJES ENTRE AÑOS 2003 A 2009

ANDRÉS GIOVANNI GUARÍN SALINAS

MODELADO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIÓN SOCKET - MUÑÓN, EN AMPUTADOS DE MIEMBRO INFERIOR

JOSÉ ALEJANDRO GUERRERO VARGAS, DIEGO PATAQUIVA WILCHES

XPS STUDY FOR CZTS THIN FILMS GROWTH BY PVD CO-EVAPORATION METHOD

MIKEL FERNANDO HURTADO MORALES

GRADO DE CUMPLIMIENTO Y CONOCIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 371 DE 2009, REFERENTE AL MANEJO DE MEDICAMENTOS VENCIDOS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA

LAURA XIMENA LOBO BERBESÍ, DIANA CATALINA REINA GALINDO, LUIS DAVID GÓMEZ MÉNDEZ

EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN UNA CORRIENTE DE GAS MEDIANTE EL USO DE CHLORELLA VULGARIS

IVÁN RODRIGO ASTROS, MARÍA CAMILA NAVARRO, ADRIANA INÉS PÁEZ

DISEÑO DE UN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT A ESCALA BANCO

DIEGO RUBIO FERNÁNDEZ, JENNIFER ALEXANDRA SIERRA HERRERA, STEVE RUIZ FONSECA, JUAN ANDRÉS SANDOVAL HERRERA

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SISTEMA MO/CUINS₂/ZN(O,OH)₂/ZNO POR MEDIO DE ESPECTROSCOPÍA FOTOELECTRÓNICA XPS Y AES

WILLIAM A. VALLEJO, CARLOS E. DIAZ-URIBE, MIKEL HURTADO