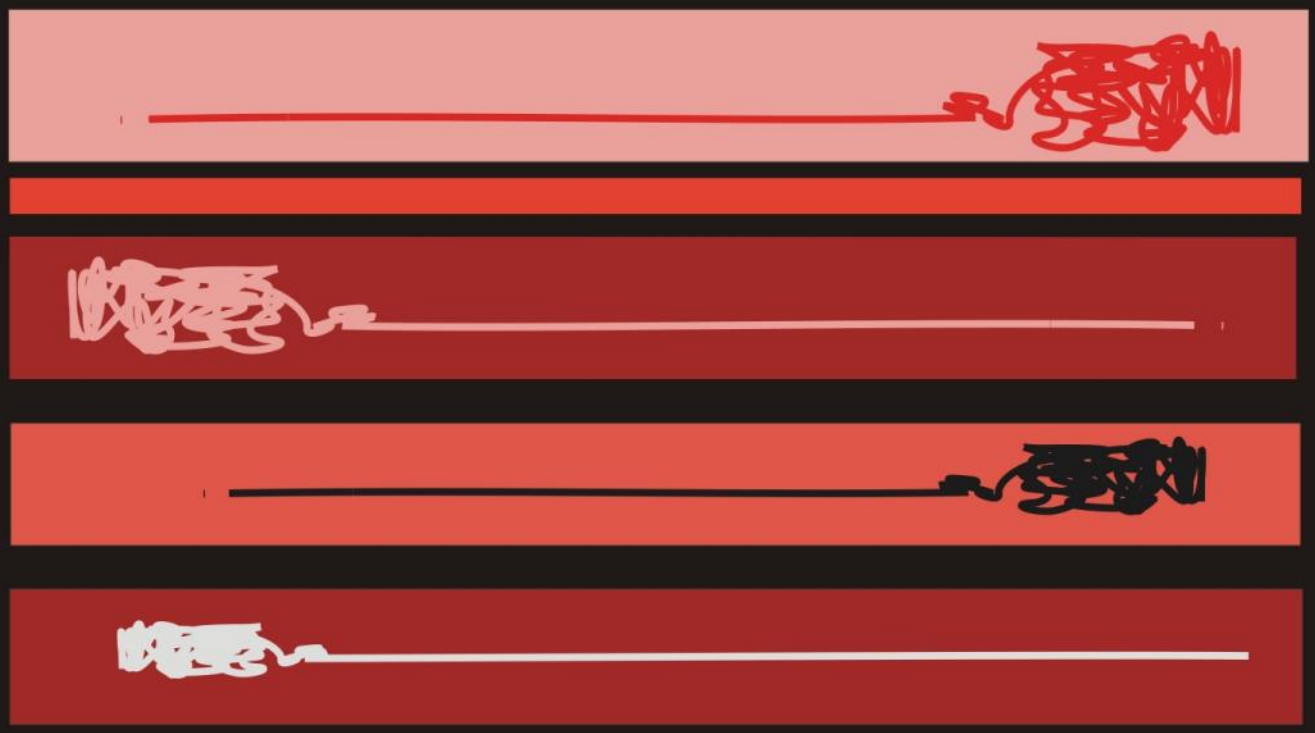
ISSN 2343 - 6360

REVISTA TECNOCIENTÍFICA URU

Nº 8 Enero - Junio 2015



Facultad de Ingeniería
Universidad Rafael Urdaneta
Maracaibo, Venezuela

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

N° 8 Enero - Junio 2015

Revista Tecnocientífica URU

Universidad Rafael Urdaneta

40 años de futuro 1973-2013

Revista Tecnocientífica URU

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

2015© Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Maracaibo, Venezuela

Portada: Lcda. Luz Elena Hernández
Diseño y maquetación: Impresos Grafifor, C.A.

SE ACEPTAN CANJES

Se prohibe la reproducción total o parcial de esta revista en cualquier forma, sin la autorización de los editores.

FONDO EDITORIAL BIBLIOTECA
Universidad Rafael Urdaneta

Revista Tecnocientífica URU

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

Comité Editorial

Dra. Laugeny Díaz
Ing. Alfredo Villalobos
Dr. Edixon Gutiérrez
Ing. Carlos Belinskif
Ing. Lenín Herrera
Ing. Nerio Villalobos
Ing. Augusto Galo

Dra. Susana Salinas
Editora-Jefe

Br. María Laura Ortíz
Asistente Editorial

Comité de Asesores

MSc. Oscar Urdaneta (Venezuela)
Dr. Shyam Kalla (India)
Dr. Cézar García (Venezuela)
Dr. José Sarabia (Venezuela)
Dr. José Rincón (Venezuela)
MSc. Zulay Mármol (Venezuela)
Dra. Cateryna Aiello (Venezuela)
Dra. Elba Michelena (Panamá)
Dr. Rafael Aracil (España)
MSc. Salvador Conde (Venezuela)
Dr. Ever Morales (Ecuador)
Dra. Nola Fernández (Venezuela)
Dr. Helí Lugo (Venezuela)
Dr. Ras Patnaik (Estados Unidos)
Dr. Gerardo Aldana(Venezuela)
Dra. Anali Machado (Canadá)
MSc. Ramón Cadenas (Venezuela)
Dr. Maulio Rodríguez (Venezuela)
Dr. Katsuyuki Nishimoto (Japón)
Dr. Jorge Sánchez (Venezuela)
Dra. Yaxcelys Caldera (Venezuela)
Dra. Oladis de Rincón (Venezuela)
Dr. Nelson Márquez (Venezuela)
Dr. Ramón Cova (Canadá)
Dr. Mourad E.H. Ismail (Estados Unidos)
Dra. Marinela Colina (Venezuela)
Dr. Freddy Isambert (Venezuela)
Dr. Miguel Sánchez (Venezuela)
Dr. Jorge Barrientos (Venezuela)
Dr. Ernesto Cornieles (Venezuela)

Revista Tecnocientífica URU es un instrumento de divulgación científica adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela. Es una revista arbitrada con periodicidad semestral, contentiva de artículos científicos originales no publicados en las áreas de Ingeniería y Arquitectura y otras disciplinas directamente relacionadas con éstas, de autoría individual o colectiva, que cumplan con las normas de publicación.

La correspondencia debe ser enviada a: Editor Jefe, ***Revista Tecnocientífica URU***

Dirección: Universidad Rafael Urdaneta, Av. 2 c/Calle 86, entrada Sur del Parque Vereda del Lago, Maracaibo, Venezuela. Teléf. (58) (261) - 2000887, Fax (58)(261) 2000868. Correo electrónico: revistatecnocientificauru@gmail.com

La ***Revista Tenocientífica URU*** está indizada en el *Índice y Biblioteca Electrónica de Revistas Venezolanas de Ciencia y Tecnología REVENCYT* (Código RVR-070).

Universidad Rafael Urdaneta

Dr. Jesús Esparza Bracho, Rector
Ing. Maulio Rodríguez, Vicerrector Académico
Ing. Salvador Conde, Secretario

Ing. Oscar Urdaneta
Decano de la Facultad de Ingeniería

Ing. Rómulo Rincón
Decano (E) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

Ing. Jubert Pérez Zabala
Director de la Escuela de Ingeniería en Computación

Ing. Nancy Urdaneta
Directora de la Escuela de Ingeniería Civil

Ing. Arnaldo Largo
Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ing. Nelson Molero
Director de la Escuela de Ingeniería Química

Ing. Ana Irene Rivas
Directora de la Escuela de Ingeniería Industrial

Ing. Carlos Belinskif
Director de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones

Arq. Carlos Aguilar
Director de la Escuela de Arquitectura

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Contenido

Presentación
Presentation

Análisis, diseño y simulación del sistema subactuado Pendubot
Analysis, design and simulation of Pendubot subactuated mechanical systems
Atilio Morillo y Maribel Pérez Pirela 11

Remoción de arsénico presente en oil fly ash por lixiviación ácida
Arsenic removal from oil fly ash by acid leaching
José González, Julissa Arguelles, Milagros Ojeda, Juan Hernández, Gabriela Carruyo y Cezar García 19

Sistema de control en modo deslizante para regular la posición y la velocidad de un motor de corriente directa
Sliding mode control to regulate the speed and position of a motor of direct current
Ernesto Cornieles y Jacobo Ramírez 35

Evaluación fisicoquímica y fitoquímica de Granada (*Punica granatum* L.)
Evaluation of physical and phytochemical properties of the granada (*Punica granatum* L.)
Johana Raga, Zulay Marmol, Evelyn Pérez, Gisela Páez y Karelen Araujo 47

Cuantificación y caracterización de los residuos de alimentos del Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia
Quantification and characterization of food residues from the Student Central Dinning of the University of Zulia
Karina Martínez, John Sánchez, Yuleidi Raga, Zulay Marmol, Elsy Arenas y Cateryna Aiello 57

Modelado de problema de regresión lineal con método Cuasi-Newton
Modeling linear regression problem with Quasi-Newton method
Eddy Rodríguez 69

Efecto de las condiciones de hidrofobización de una arcilla natural sobre su distribución y dispersión en mezclas de poliestireno/polibutadieno/estireno
Effect of the hydrophobization conditions of natural clay on its distribution and dispersión in polystyrene/polybutadiene/styrene blends
Ida González, Haydee Oliva, Ysabel Cedeño, Helen Inciarte, Diana Soto y Eliezer Velásquez 79

Estudio del comportamiento de las redes sónicas de alta velocidad
Study of performance of the sonic high speed networks
Luis Rojas 91

Índice acumulado 101

Normas para la presentación de artículos 109

Guides for submitting articles 113

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Presentación

La crisis de la investigación en Venezuela

En el mundo actual, caracterizado por un cambio vertiginoso e inesperado y por una creciente globalización, el paradigma de una universidad tradicional y casi inmutable no resulta muy congruente con las nuevas realidades y demandas sociales y científicas, tanto actuales como futuras. Por otro lado, si partimos de la premisa de que «ninguna sociedad actual es superior a sus universidades», resulta evidente que un instrumento esencial del progreso y el desarrollo es la universidad. En efecto, no hay países realmente avanzados que no cuenten con un eficaz sistema universitario y, dentro de él, con una sólida y permanente investigación. Estas afirmaciones adquieren especial importancia para el caso de Venezuela y demás países en desarrollo, donde, por la acumulación de diversos factores, muchas de sus universidades más importantes están evidenciando hoy en día, serias y continuas limitaciones para poder modificar rápida y profundamente sus modelos, estructuras y procedimientos obsoletos, con la finalidad de responder funcional y oportunamente a las nuevas y exigentes demandas. Por el contrario, la universidad venezolana está sumergida en una crisis que trastoca profundamente su más vulnerable actividad: la investigación.

Dicha crisis se manifiesta en la carencia de recursos económicos que permitan una acorde remuneración para los investigadores y, por otro lado, la compra de insumos, materiales y equipos de laboratorio. Estas dificultades se agudizan cada vez más, debido al bajo poder adquisitivo de nuestra moneda, fruto de sucesivas devaluaciones.

Los egresados universitarios con mayor rendimiento académico, están emigrando a otros países en busca de un mejor futuro. En el pasado, estos jóvenes eran absorbidos por las universidades para trabajar en docencia e investigación. También se marchan a otros países docentes e investigadores de alto nivel, generándose así la denominada fuga de cerebros.

La crisis venezolana tiene un carácter esencialmente institucional. El estado se hipertrofió con una burocracia improductiva y arrastró consigo al resto de las variables estructurales que constituían el modo de regulación de la mayor parte de las actividades científicas, económicas y sociales. La universidad ha obtenido importantes logros y acercamientos para con los sectores estado, industria y sociedad. Pero debemos continuar revisando la pertinencia de la universidad, es decir, si existe coincidencia entre lo que las instituciones de educación superior hacen y lo que la sociedad espera de ellas. Esto se refiere especialmente al papel y el lugar de la educación superior en el mundo laboral, tecnológico y su función de servicio en la comunidad.

Es urgente la aplicación de ciertas medidas para contrarrestar los efectos de la crisis en el sector de ciencia y tecnología. El gobierno debe abocarse a la elaboración y presentación de un programa de verdaderas políticas de estímulo para la investigación universitaria y la necesaria expansión de centros e institutos de investigación científica. Esta estructura, a su vez, debe estar articulada en forma armónica con los programas de políticas de desarrollo industrial, creando un tejido socio – institucional vigoroso.

De esta forma, se puede garantizar el adecuado soporte del conocimiento tecnológico para el desarrollo industrial del país.

Dra. Susana Salinas
Editora-Jefe

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Análisis, diseño y simulación del sistema mecánico subactuado Pendubot

Atilio Morillo y Maribel Pérez Pirela

Centro de investigación de Matemática Aplicada (CIMA). Facultad de Ingeniería.
Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela.

Amorillo7@canyv.net, Maribel.perez@fing.luz.edu.ve

Recibido: 17-10-2014 Aceptado: 23-01-2015

Resumen

En los sistemas mecánicos subactuados las técnicas de control convencionales son inoperantes cuando se requiere que el sistema esté en un punto de operación o posición de equilibrio. Un tipo de control híbrido puede implementarse cuando la complejidad del sistema hace que una sola técnica convencional de control no tenga los resultados esperados. En este trabajo partiendo de la combinación de métodos como linealización parcial por realimentación y la linealización por realimentación del vector de estados, se diseña una estrategia de control, que logra estabilizar en forma global y asintótica el punto de equilibrio deseado alcanzando un excelente desempeño. Las simulaciones numéricas mostradas al final del trabajo confirman esta apreciación.

Palabras clave: Control no lineal, sistemas mecánicos subactuados, linealización parcial por realimentación.

Analysis, design and simulation of Pendubot subactuated mechanical systems

Abstract

In mechanical systems sub-actuated conventional control techniques are ineffective when it is required that the system is in an operating point or position of equilibrium. A hybrid technique control may be implemented when system complexity makes a single control conventional technique does not accomplish the expected results. In this paper, based on the combination of methods such as partial feedback linearization and state feedback linearization a vector control strategy is designed in such a way that globally and asymptotically stabilizes the desired equilibrium point while reaching an excellent performance. Numerical simulations shown at the end of the study confirm that finding.

Key words: Nonlinear control, sub-actuated mechanical systems, partial feedback linearization

Introducción

El control de sistemas mecánicos subactuados corresponde a uno de los campos más activos de investigación de los sistemas no lineales. El sistema Pendubot es un sistema subactuado que tiene importancia en el área de robótica y por su condición de ser un sistema no lineal de gran complejidad se caracteriza porque las técnicas de control convencionales son inoperantes cuando se requiere que el sistema este en un punto de operación o posición de equilibrio [1]. Ante esta condición se requiere la implementación de técnicas de control para sistemas no lineales, las cuales permitan manejar el sistema y adaptarse a los cambios en los puntos de equilibrio de la planta.

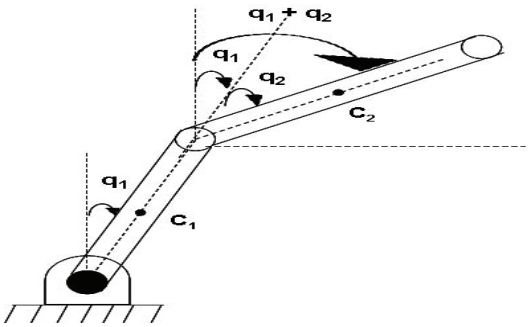
Dado este sistema físico se pretende diseñar un algoritmo de control, el cual permita llevar y mantener en la posición de equilibrio del sistema. Para ello se emplean dos estrategias de control. Una de ellas que permita llevar los dos brazos a la posición deseada y la otra que permita estabilizar o balancear este en la posición de equilibrio deseado [2].

Dinámica del sistema mecánico subactuado

Elaboración del modelo

El denominado sistema Pendubot fue introducido por primera vez en [3]. La figura 1 ilustra el interesante caso que consiste en dos brazos mecánicos giratorios con masas m_1 y m_2 respectivamente. El problema es de interés como un caso de estudio en el diseño de controles no lineales debido a que dicho modelo exhiben una interacción no lineal entre sus movimientos rotacionales. En el sistema para el brazo 1, q_1 es el ángulo de rotación, l_1 es la longitud del brazo, lc_1 es la distancia al centro de masa, I_1 es el momento de inercia en el centro de masa y C_1 es el centro de masa. Para el brazo 2, q_2 representa el ángulo de rotación, l_2 es la longitud del brazo, lc_2 es la distancia al centro de masa, I_2 es el momento de inercia en el centro de masa y C_2 es el centro de masa. En el sistema la coordenada actuada es q_1,

Figura 1. Sistema Pendubot



En el sistema existen dos subsistemas bien definidos: 1) brazo 1 y 2) brazo 2.

La energía total del sistema = Energía Cinética (K) + Energía Potencial (V), es decir, $E = K + V$. A su vez, $K = K_1 +$ y $V = V_1 + V_2$. Para la energía cinética se considera sólo la existencia de movimiento rotacional. Para la energía potencial se considera la existencia de energía potencial gravitatoria.

Para calcular la energía cinética del brazo 1 se utiliza la ecuación:

$$K_1 = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \tag{1}$$

donde K_1 = Energía cinética rotacional y $\dot{\theta} = \dot{q}_1$

El momento de inercia I esta dado respecto del centro de rotación, por lo tanto, aplicando el teorema de Steiner, se tiene que:

$$I = I_1 + m_1 lc_1^{\,2} \rightarrow K_1 = \frac{1}{2}\left(I_1 + m_1 lc_1^{\,2}\right)\dot{q}_1^{\,2} \tag{2}$$

Para calcular la energía cinética del brazo 2 se utiliza el teorema de Koenig:

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_G^{\,2} + \frac{1}{2} I\dot{\theta}^2 \tag{3}$$

donde:

K_2 = Energía cinética traslacional + Energía cinética rotacional

$$\dot{\theta} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \ , \ v_G = \dot{C}_2 \ , \ I = I_2 \ \rightarrow K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_G^{\,2} + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2$$

Utilizando la energía cinética y potencial se determina el Lagrangiano del sistema:

$$L = K(q_i, \dot{q}_i, t) - V(q_i, t) \tag{4}$$

$$L = \frac{1}{2}(I_1 + m_1 lc_1^{\,2} + m_2 l_1^{\,2} + m_2 lc_2^{\,2} + I_2 + 2m_2 l_1 lc_2 \cos(q_2))\dot{q}_1^{\,2} + (m_2 lc_2^{\,2} + I_2 + \ldots$$

$$\ldots + m_2 l_1 lc_2 \cos(q_2))\dot{q}_1\dot{q}_2 + \frac{1}{2}(I_2 + m_2 lc_2^{\,2})\dot{q}_2^{\,2} - (m_1 lc_1 + m_2 l_1) g\cos(q_1) - m_2 lc_2 g\cos(q_1 + q_2)$$

Generalizando al caso de sistemas sometidos a fuerzas externas, las trayectorias $q(t)$ serán soluciones al sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \tag{5}$$

Para el sistema Pendubot $q = (q_1, q_2)^T$ representan las variables generalizadas, una por cada grado de libertad. Así como $\tau = (\tau_1, 0)^T$ denota las fuerzas que son externas aplicadas al sistema. Y τ_1 es el torque aplicado a la primera coordenada q_1.

Estas ecuaciones, en el caso de sólidos rígidos y en ausencia de fricción pueden escribirse como sigue:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = B(q, \dot{q})\tau \tag{6}$$

Y las ecuaciones del sistema Pendubot resultarían:

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 + 2c_3\cos(q_2) & c_2 + c_3\cos(q_2) \\ c_2 + c_3\cos(q_2) & c_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_3 sen(q_2) & -c_3 sen(q_2)\dot{q}_2 - c_3 sen(q_2)\dot{q}_1 \\ c_3 sen(q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_4 g\cos(q_1) + c_5 g\cos(q_1 + q_2) \\ c_5 g\cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\tau \tag{7}$$

donde:

$c_1 = m_1 lc_1^{\,2} + m_2 l_1^{\,2} + I_1$, $c_2 = m_2 lc_2^{\,2} + I_2$, $c_3 = m_2 l_1 lc_2$, $c_4 = m_1 lc_1 + m_2 l_1$, $c_5 = m_2 lc_2$

De tal manera que el sistema se puede expresar:

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = p_1 \\ \dot{p}_1 = \dfrac{1}{\delta}\left[\alpha + c_2 * \tau\right] \\ \dot{q}_2 = p_2 \\ \dot{p}_2 = \dfrac{1}{\delta}\left[\beta + (-c_2 - c_3 * \cos(\mathrm{q2})) * \tau\right] \end{cases} \tag{8}$$

donde:

$$\alpha = 2*c_3*\sin(q_2)*p_2*p_1*c_2 + c_3*\sin(q_2)*p_2^{\,2}*c_2 - c_4*g*\cos(q_1)*c_2 + \ldots$$
$$\ldots + c_2*c_3*\sin(q_2)*p_1^{\,2} + c_3*c_5*g*\cos(q_2)*\cos(q_1+q_2) + \ldots$$
$$\ldots + c_3^{\,2}*\cos(q_2)*\sin(q_2)*p_1^{\,2}$$

$$\beta = -2*c_3*\sin(q_2)*p_2*p_1*c_2 - c_3*\sin(q_2)*p_2^{\,2}*c_2 + c_4*g*\cos(q_1)*c_2 - \ldots$$
$$\ldots - 2*c_3^{\,2}*\cos(q_2)*\sin(q_2)*p_2*p_1 - c_2*c_3*\sin(q_2)*p_1^{\,2} - c_3*c_5*g*\cos(q_2)*\cos(q_1+q_2) - \ldots$$
$$\ldots - 2*c_3^{\,2}*\cos(q_2)*\sin(q_2)*p_1^{\,2} - c_5*g*\cos(q_1+q_2)*c_1 - c_3^{\,2}*\cos(q_2)*\sin(q_2)*p_2^{\,2} + \ldots$$
$$\ldots + c_3*c_4*g*\cos(q_2)*\cos(q_1) - c_3*\sin(q_2)*p_1^{\,2}*c_1$$

$$\delta = c_1*c_2 - c_3^{\,2}*\cos(q_2)^2$$

Identificación de los Parámetros

Basado en el método utilizado por Mechanotronic Systems Inc se aplica un proceso de identificación de parámetros.

Para ello, se utiliza la ecuación de pasividad:

$$\dot{E} = \dot{q}^T \tau \tag{9}$$

Entre dos tiempos dados $t = T$ y $t = T + dT$ se obtiene

$$dE = E(T+dT) - E(T) \longrightarrow = \int_T^{T+dT} \dot{q}^T(u)*\tau(u) = \{w(T+dT) - w(T)\}*c$$

Donde se ha usado $E = w(q,\dot{q})*c$ y $c = [c_1 \ldots\ldots c_5]^T$ es la parametrización.

Llevando a cabo este procedimiento de identificación se obtienen los siguientes parámetros: $c_1 = 0.0308..Vs^2$ $c_2 = 0.0106..Vs^2$ $c_3 = 0.0095..Vs^2$ $c_4 = 0.2086..Vs^2/m$ y $c5 = 0.0630..Vs^2/m$.

Análisis de los Puntos Críticos

Para el Pendubot mostrado en la figura 1 existen cuatro posibles puntos críticos

$(\frac{\pi}{2},0)$ arriba-arriba; $(\frac{\pi}{2},-\pi)$ arriba-abajo; $(-\frac{\pi}{2},\pi)$ abajo arriba y $(-\frac{\pi}{2},0)$ abajo-abajo

El punto crítico $(-\frac{\pi}{2},0)$ abajo-abajo, es punto de equilibrio estable, ya que es el estado del sistema inicial para el cual no se debe ejercer ningún torque sobre el pivote de los péndulos, por lo tanto el sistema esta en reposo.

Por el contrario el punto crítico $(\frac{\pi}{2},0)$ arriba-arriba, es punto de equilibrio inestable. Para esta posición inestable se desarrolla una estrategia de control la cual permita llevar el sistema a la posición deseada en equilibrio estable.

Metodología del diseño del control

El objetivo del controlador es el de llevar el sistema mecánico subactuado de la posición de equilibrio estable a una posición de equilibrio inestable en donde el sistema se balancea y mantenerlo en equilibrio.

La estrategia de control se divide en dos partes. La primera de ellas emplea un controlador que se encarga de llevar los dos brazos cerca de la posición deseada mediante la oscilación del brazo 1 (*swing up Control*) [4] y se desarrolla aplicando el método de Linealización Parcial por Realimentación [5], la segunda estrategia mantiene estable el sistema en la posición de equilibrio (*balancing Control*) empleando una técnica lineal para la realimentación óptima del estado del sistema mediante la identificación de los parámetros.

Cada una de las estrategias se definen a continuación.

Swing up Control

Las ecuaciones del movimiento que se plantearon en (7) son no lineales y describen por completo la dinámica del sistema. Debido a que el brazo dos es independiente del punto en donde se aplica la acción de control (inactiva), solo se puede linealizar el grado de libertad activo del sistema (brazo uno) [2]. El método de linealización mas adecuado para desarrollar este controlador es el de Linealización Parcial por Realimentación planteado en [2] y [6]. Se tiene entonces que:

$$u = -K_p(q_1 - q_1^{ref}) - K_d p_1 \tag{10}$$

En donde q_1 representa la posición angular del brazo uno y q_1^{ref} es la posición en la cual se quiere ubicar el sistema. Los parámetros K_p y K_d son ganancias que se deben sintonizar para la generación de la trayectoria.

De la expresión $\ddot{q}_1 = \frac{1}{\delta}[\alpha + c_2 * \tau]$ se obtiene que: $u = \frac{1}{\delta}[\alpha + c_2 * \tau]$. Y por lo tanto $\tau = \frac{1}{c_2}[\delta * u - \alpha]$.

Balancing Control

Esta técnica o procedimiento consiste en implementar un controlador que se encargue de mantener estable el Pendubot alrededor de una posición de equilibrio. Para ello se diseña un controlador a partir de la linealización del sistema alrededor de los puntos de operación. Con el modelo linealizado se emplea un lazo de realimentación el cual realimente las variables de estado para cada posición de equilibrio deseada.

Luego de que se obtiene el modelo del Pendubot en la ecuación (7), se linealiza este para la posición de equilibrio inestable del sistema, cuando $(\frac{\pi}{2},0,0,0)$. Los valores de estas derivadas se calcularon en dicho punto y se obtiene:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(c_2 * c_4 - c_3 * c_5)g}{\delta} & 0 & \frac{-c_3 * c_5 * g}{\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_5 * g * (c_1 + c_3) - c_4 * g * (c_2 + c_3)}{\delta} & 0 & \frac{g * (c_1 * c_3 + c_3 * c_5}{\delta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_2}{\delta} \\ 0 \\ \frac{-c_2 - c_3}{\delta} \end{bmatrix}$$

resultando el sistema de la forma $\dot{x} = Ax + Bu$.

Para el diseño del control proporcional se utiliza el mecanismo de ubicación de polos. Es decir, se elige $K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4]$ haciendo $u = -Kx$. Resultando el sistema $\dot{x} = Ax + B(-Kx) \longrightarrow \dot{x} = (A - BK)$. Entonces basta elegir K de modo que $A - BK$ posea valores propios todos con parte real negativa.

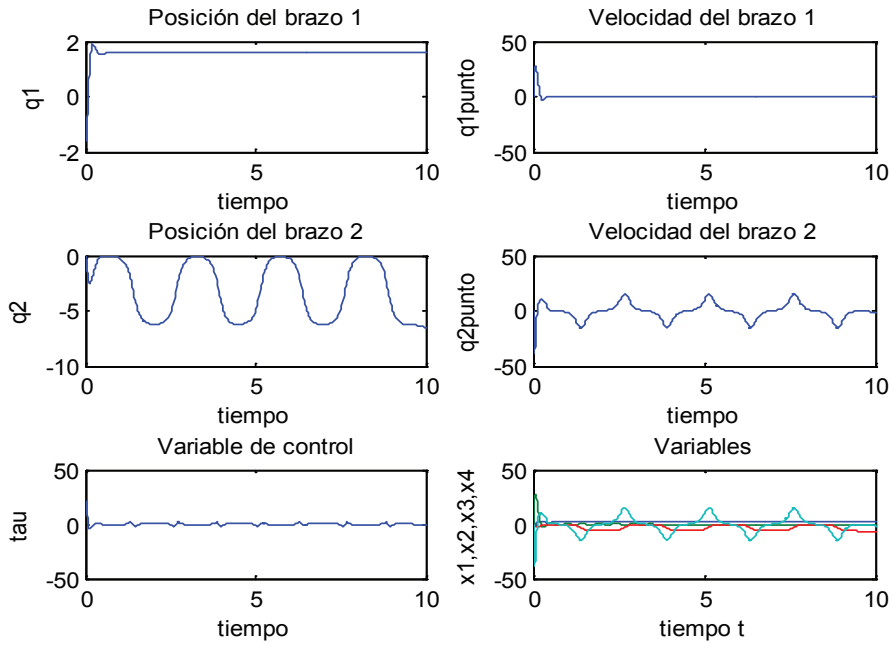
Utilizando la técnica LQR a través del programa Matlab, se obtiene un vector de ganancias K = [–379.81 –240.80 –368.34 –189.02], el cual convierte al sistema $\dot{x} = Ax + Bu$ en un sistema globalmente asintóticamente estable alrededor del punto de equilibrio $(\frac{\pi}{2},0,0,0)$.

Con el fin de que el sistema pueda ser controlado por los dos algoritmos diseñados en Matlab, estos deben actuar en determinados momentos según sean las posiciones angulares de los brazos. Estos algoritmos contienen un bloque Switch que decide cual de las estrategias de control debe pasar al actuador del Pendubot según sean las posiciones de los brazos 1 y 2.

Simulaciones Numéricas

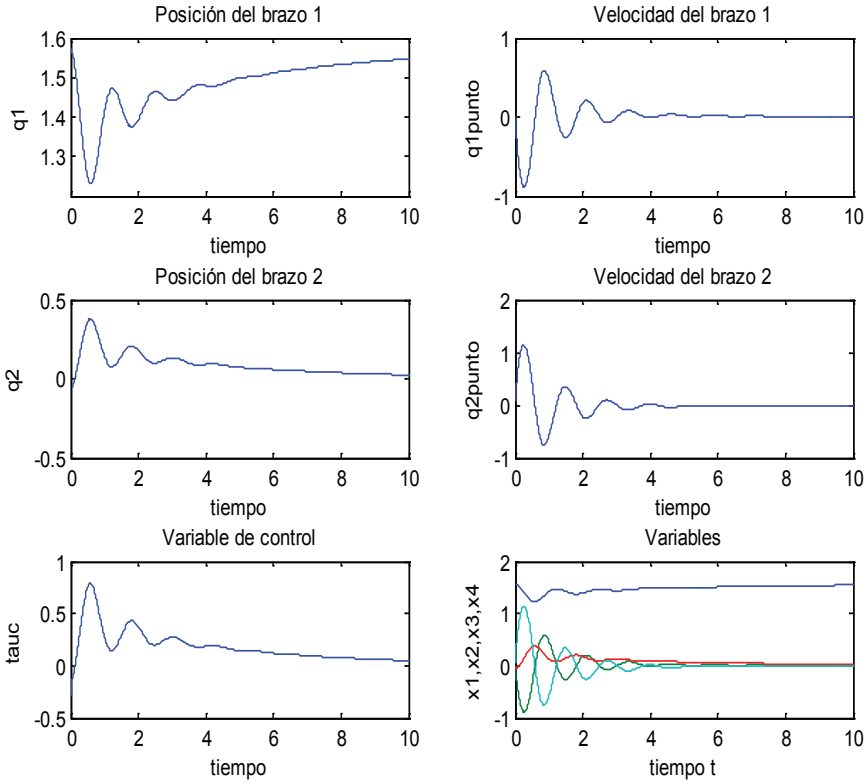
Para los algoritmos de control se desarrollan varios programas en Matlab los cuales se basan en los criterios planteados anteriormente. En la figura 2 se muestra el comportamiento de las cuatro variables de estado del sistema (posición y velocidad angulares de cada uno de los brazos).

Figura 2. Comportamiento de las variables con la aplicación del Swing up Control



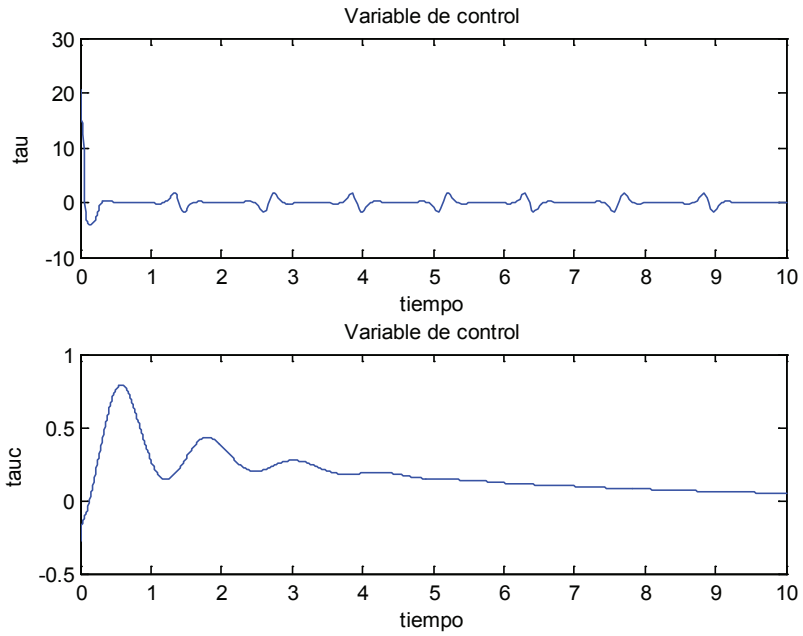
Se observa como inicialmente entra en funcionamiento el algoritmo que genera la trayectoria para que el sistema oscile hasta alcanzar su referencia (*swing up*), luego cuando el algoritmo determina a través del bloque switch que se ha llegado a la posición deseada, se observa en la figura 3 que la estrategia cambia al control que realiza la estabilización o balanceo alrededor del punto de operación (*balancing*).

Figura 3. Comportamiento de las variables con la aplicación del Balancing Control



En la figura 4 se observa como ambas funciones de control son de naturaleza acotada, ya que se observa que la convergencia es a cero. También es importante destacar que ambos controles logran estabilizar el sistema en un tiempo de simulación o tiempo de asentamiento perfectamente aceptable.

Figura 4. Comportamiento del Swing up Control y Balancing Control



Conclusiones

El estudio de técnicas híbridas de control es una herramienta útil para el manejo de sistemas no lineales. Estas permiten hacer una descripción del sistema y establecer las regiones de operación del mismo con el fin de tomar una decisión para ejecutar una estrategia de control.

Al final se realizaron simulaciones numéricas que muestran el excelente comportamiento del controlador diseñado, ya que logra con éxito llevar y mantener a la posición de equilibrio deseada del sistema. Se logra establecer que el brazo 1 alcanza la posición de equilibrio deseada en un tiempo aproximado de 8 segundos, en ese instante el algoritmo diseñado decide emplear la otra técnica de control que logra estabilizar el sistema.

Referencias bibliográficas

1. J. Ortega and L. Weiping. “Applied Nonlinear Control”, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
2. M. Escobar “Control Óptimo del Pendubot con Técnicas Inteligentes Utilizando un DSP”, Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Diciembre de 2005.
3. R. Ortega, M. Spong, F. Gómez and G. Blankestein G. “Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and camping assignment”. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. C, AC-47, N° 8, March 2002, pp: 1218-1233.
4. M. Spong. “The swing up control problem for the acrobot”, IEEE, Contr. Syst. Mag., Vol. 15., sept. 1995. pp. 49-55.
5. J. Slotine and L. Weiping. “Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, New Jersey 1991.
6. V. Zoran. “Nonlinear Control Systems”, Control Engineer Series, Marcel Dekker, inc., New York, 2003.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Remoción de arsénico presente en oil fly ash por lixiviación ácida

José González[1], Julissa Arguelles[1], Milagros Ojeda[1], Juan Hernández[1], Gabriela Carruyo[1] y Cezar García[2]

[1]Laboratorio de Carbón, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

[2]Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.

Email: amorosogonzalez@yahoo.com

Recibido: 16-05-2014 Aceptado:23-01-2015

Resumen

El objetivo general de esta investigación es el estudio de la remoción del arsénico presente en las cenizas volantes, a través del proceso de lixiviación. La muestra utilizada corresponde a las cenizas volantes provenientes de la planta termoeléctrica "Ramón Laguna". Este proceso de remoción comprendió: lixiviación ácida con variación de temperatura, tamaño de partícula, concentración del ácido y tiempo de contacto. Los tamaños de partículas seleccionados fueron: muestra original, -40+90 mesh y -90+160 mesh. Los agentes lixiviantes utilizados fueron ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, en 10, 20 y 30% de dilución para ambos. La cuantificación del contenido de metales, se realizó por Espectrometría de Masa con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP). Para la óptima remoción de arsénico, las condiciones operacionales de lixiviación encontradas fueron: Ácido sulfúrico al 30%, 45°C, -90+160 mesh, 3 horas de contacto y concentración máxima removida de 0,1900 ppm, Ácido clorhídrico al 30%, 45°C, -90+160 mesh, 3 horas de contacto y concentración máxima removida de 0,2125 ppm. La remoción del arsénico es importante ya que es un gran contaminante para el hombre y el ambiente. Este proceso permite la remoción eficiente de arsénico de las cenizas volantes provenientes de la combustión del fuel oíl.

Palabras clave: Cenizas volantes, arsénico, lixiviación ácida

Arsenic removal from oil fly ash by acid leaching

Abstract

The objective of this research is to study the process of removal of arsenic from fly ash, through the leaching process. The samples used correspond to fly ash from thermal power plant "Laguna Ramon." This removal process included: acid leaching with variation of temperature, particle size, acid concentration and contact time. The particle sizes were selected: original sample, -40 +90 mesh and -90 +160 mesh. The leaching agents used were sulfuric acid and hydrochloric acid, 10, 20 and 30% dilution for both. The quantification of metal content was performed by Inductivily Coupled Plasma (ICP). For optimum removal of arsenic, leaching conditions found were: 30% sulfuric acid, 45°C, -90 +160 mesh, 3 hours of exposure and maximum concentration of 0.1900 ppm removed, hydrochloric acid 30%, 45°C, -90 +160 mesh, 3 contact hours and maximum concentration of 0.2125 ppm removed. Arsenic removal is important because it is a major pollutant for humans and the environment.

Key words: Oil fly ash, arsenic, removal, acid lixiviation.

Introducción

Las cenizas volantes, también conocidas como Oil Fly Ash son generadas por las plantas termoeléctricas, las cuales utilizan combustibles fósiles, fuel oil y gas natural para la producción de vapor y energía. El Oil Fly Ash, es producto de la combustión incompleta de los materiales carbonosos conjuntamente con el residuo inorgánico, arrastrado por los gases de combustión hasta los topes de las chimeneas para la dispersión y distribución por los vientos en los alrededores a las plantas termoeléctricas.

Existen estudios epidemiológicos que demuestran el incremento de la morbilidad y mortalidad humana con el incremento de la concentración de material particulado en el aire [(1)]. La planta termoeléctrica bajo estudio se encuentra ubicada en el estado Zulia, Venezuela con una generación de 50 toneladas por mes de oíl fly ash [(2)], mientras en los Estados Unidos se descargan mas de 4000 toneladas por mes de oil fly ash [(3)].

El oil fly ash presenta la siguiente composición, carbono como elemento dominante con concentración porcentual entre 64 y 87% (p/p); vanadio entre 0.50 y 5%; níquel, hierro y zinc entre 0.1 y 0.5%; y plomo, arsénico, cromo, cobre, magnesio antimonio y cadmio, concentraciones entre 20 y 10.000 ppm que podrían ser significantes para consideraciones de salud pública [(4)].

Las cenizas volantes expuestas a corrientes de agua generan procesos de lixiviación con la transferencia de metales y la contaminación de ríos o lagos. Estudios demuestran que el arsénico se adsorbe fuertemente a las partículas del suelo donde las cenizas volantes se depositan por la dispersión atmosférica, si embargo pueden ser desplazadas por soluciones conteniendo $Ca(H_2PO_4)_2.CaSO_4$, alcanzando concentraciones máximas de 800 µg/l comparando con la concentración de 50 µg de As/l para agua potable [(5)].

El objetivo de la presente investigación es analizar las condiciones operacionales bajo ensayos batch de la lixiviación de las cenizas volantes provenientes de la combustión del fuel oíl en la planta termoeléctrica del estado Zulia [(6)].

Procedimiento experimental

Selección de la muestra

Las cenizas volantes producto de la combustión del fuel oíl son obtenidas del sitio de disposición final de almacenamiento, en la planta termoeléctrica Ramón Laguna, ubicada en la Avenida Los Haticos, sector La Arreaga, Municipio Maracaibo, Estado Zulia. La cantidad de muestra utilizada para este trabajo es de 20 Kg recogidos en un envase de plástico herméticamente cerrado para evitar posibles fugas que contaminen el ambiente y la misma muestra.

Caracterización de las cenizas

Distribución granulométrica de las cenizas por tamizado

Para la distribución granulométrica se agregan en los tamices seleccionados del separador electromecánico una cantidad determinada de cenizas, se agitan por un tiempo de 10 minutos. Se recogen y se separan las fracciones de muestra de cada tamiz. Las granulometrías utilizadas se presentan en la tabla 1, que corresponden a las secciones mayoritarias de la separación.

Tabla 1. Granulometrías utilizadas

Tamiz (Mesh)	Muestra Original	-40 + 90	-90 + 160

Cuantificación de metales por digestión ácida

La técnica de análisis utilizada para la medición de concentración de metales es la Espectrometría de Masa con Plasma de Acoplamiento Inductivo de la serie ICAP, marca Thermo Electron Corporation, previa destrucción de la materia orgánica.

Destrucción de la materia orgánica

Para la destrucción de la materia orgánica se emplea el método de oxidación por vía húmeda, utilizando como reactivos el ácido sulfúrico, el ácido nítrico y el ácido perclórico, todos concentrados, en una relación de volumen 10:10:1 con este fin se pesan 250 mg de cada muestra a analizar y se introducen en un balón de Kjeldahl de 100 ml. Se agregan los ácidos en la relación recomendada. El balón se calienta suavemente durante cuatro horas aproximadamente. Este proceso se suspende cuando el contenido del balón adquiera una coloración naranja cristalina, lo cual es indicativo de la eliminación de la materia orgánica.

La solución resultante se filtra y se diluye con agua desionizada en un balón aforado de 50 ml. Se trasvasa a un envase de polietileno de 70 ml y se mantiene para su posterior análisis [(7)].

Ensayo de lixiviación

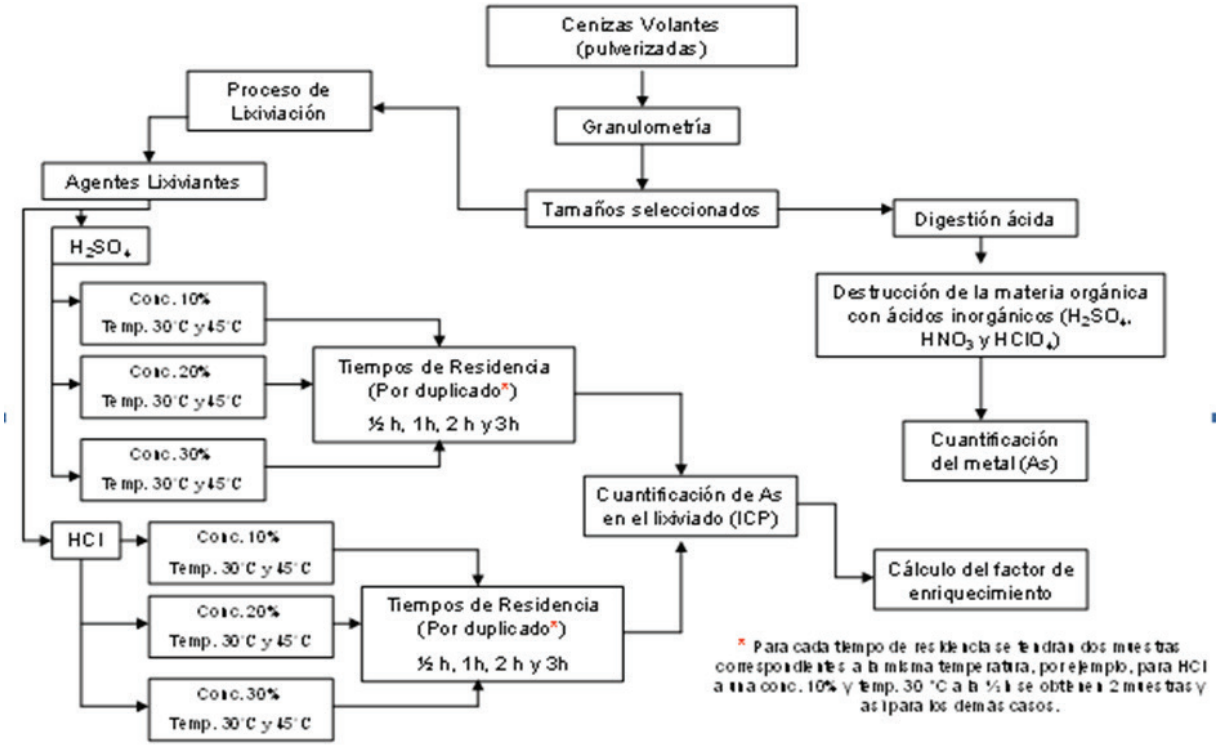
Proceso de Extracción

El proceso de extracción de los metales de las muestras de cenizas volantes, se realiza mediante ensayos cinéticos de lixiviación en caliente utilizando como agentes lixiviantes ácidos inorgánicos como H_2S0_4 y HCl, bajo concentraciones óptimas (10%, 20% y 30%). Las temperaturas a considerar son: 30°C y 45°C para el análisis cinético del factor de enriquecimiento. Dentro de este mismo proceso se analiza la incidencia del tamaño de partícula sobre el factor de enriquecimiento.

Lixiviación ácida

Para los ensayos cinéticos de lixiviación ácida se utiliza, un matraz erlenmeyer de 125 ml de capacidad donde se colocan 2 g de muestra a la cual se le agrega la solución lixiviante en una densidad de mezcla 1:10 (cenizas / ácido), un magneto de agitación y se tapa. Sobre la plancha de agitación y calentamiento se coloca un vaso de precipitado con agua y se lleva a la temperatura correspondiente (30°C y 45°C) dependiendo del caso, la cual se mantiene en todo el proceso. Una vez alcanzada la temperatura se introduce dentro del matraz y se inicia el proceso de agitación, durante períodos de tiempo de media hora, una hora, dos horas y tres horas. Una vez culminado el proceso de lixiviación, se filtra la solución resultante, se toman 10 ml del filtrado, se vierten en un balón aforado de 50 ml, se diluyen con agua desionizada hasta enrasar y se trasvasa a los envases de polietileno de 60 ml los cuales se mantienen refrigerados para su respectivo análisis mediante el espectrómetro ICP. En la Figura 1 se muestra el diagrama del proceso experimental de lixiviación ácida del oil fly ash para la remoción de arsénico.

Figura 1. Diagrama del proceso experimental.



Discusión de resultados

En la tabla 2 se muestra la determinación de Arsénico para los distintos tamaños de partículas a saber: Muestra Original, -40 + 90 mesh y -90 + 160 mesh. El contenido del metal de interés fue de 0,2105 ppm de As para la Muestra Original, 0,1185 ppm de As para un tamaño de partícula de -40 + 90 mesh y de 0,2825 ppm de As para -90 + 160 mesh. Puede observarse que la mayor concentración de As previa destrucción de la materia orgánica corresponde a la muestra de menor tamaño (-90 + 160 mesh).

Tabla 2. Determinación de Arsénico por Emisión Atómica con plasma inductivamente acoplado previa destrucción de la materia orgánica.

Tamaño de partícula (Mesh)	Arsénico (ppm)
Muestra Original	0,2105
- 40 + 90	0,1185
- 90 + 160	0,2825

En las tablas 3-8 se presentan la concentración del arsénico en la fase del agente lixiviante, ácido sulfúrico H_2SO_4, como función del tiempo de residencia para las diferentes condiciones operacionales de granulometría, temperatura de mezcla y grado de concentración del ácido.

Tabla 3. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: H_2SO_4			
Tamaño de partícula: Muestra original			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.0707	0.0831
	1	0.0823	0.0833
	2	0.0825	0.0835
	3	0.0826	0.0836
20	½	0.0837	0.0838
	1	0.0841	0.0843
	2	0.0843	0.0846
	3	0.0845	0.0849
30	½	0.0837	0.0859
	1	0.0893	0.0894
	2	0.0896	0.0897
	3	0.0897	0.0899

Tabla 4. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: H_2SO_4			
Tamaño de partícula: -40+90 mesh			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.0432	0.0472
	1	0.0473	0.0476
	2	0.0478	0.0481
	3	0.0480	0.0486
20	½	0.0513	0.0565
	1	0.0562	0.0580
	2	0.0594	0.0596
	3	0.0596	0.0599
30	½	0.0600	0.0604
	1	0.0710	0.0712
	2	0.0712	0.0715
	3	0.0714	0.0716

Tabla 5. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: H_2SO_4			
Tamaño de partícula: -90+160 mesh			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.1644	0.1791
	1	0.1650	0.1831
	2	0.1656	0.1851
	3	0.1680	0.1860
20	½	0.1700	0.1865
	1	0.1710	0.1870
	2	0.1712	0.1873
	3	0.1714	0.1875
30	½	0.1716	0.1880
	1	0.1720	0.1885
	2	0.1724	0.1889
	3	0.1726	0.1900

Tabla 6. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: HCl			
Tamaño de partícula: Muestra original			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.0908	0.0942
	1	0.0914	0.0952
	2	0.0918	0.0960
	3	0.0920	0.0975
20	½	0.0978	0.0982
	1	0.0980	0.0985
	2	0.0985	0.0990
	3	0.0986	0.0992
30	½	0.0980	0.0984
	1	0.0985	0.0988
	2	0.0988	0.0990
	3	0.0990	0.0996

Tabla 7. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: HCl			
Tamaño de partícula: -40+90 mesh			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.0546	0.0582
	1	0.0574	0.0588
	2	0.0588	0.0590
	3	0.0590	0.0594
20	½	0.0630	0.0635
	1	0.0652	0.0655
	2	0.0655	0.0658
	3	0.0656	0.0660
30	½	0.0635	0.0664
	1	0.0640	0.0666
	2	0.0642	0.0668
	3	0.0644	0.0670

Tabla 8. Efecto del tiempo de residencia y de la concentración de la solución lixiviante en la remoción de arsénico.

Solución lixiviante: HCl			
Tamaño de partícula: -90+160 mesh			
Concentración del Ácido	**Tiempo de residencia (h)**	**Concentración lixiviada (ppm) 30°C**	**Concentración lixiviada (ppm) 45°C**
10	½	0.1893	0.2016
	1	0.1971	0.2108
	2	0.1990	0.2115
	3	0.2020	0.2118
20	½	0.1902	0.2020
	1	0.1991	0.2112
	2	0.2043	0.2118
	3	0.2060	0.2122
30	½	0.1915	0.2032
	1	0.1995	0.2115
	2	0.2050	0.2122
	3	0.2070	0.2125

La tabla 3 y en forma gráfica las figuras 2-7 corresponden al tamaño de partícula de la muestra original a las temperaturas de 30°C y 45°C respectivamente; la tabla 4 corresponde a la fracción granular dado por los tamices -40+90 mesh a las temperaturas de 30°C y 45°C respectivamente; y la tabla 5 corresponde a la fracción pulverizada de las cenizas volantes dado por los tamices -90+160 mesh a las temperaturas de 30°C y 45°C.

Figura 2. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 10%.

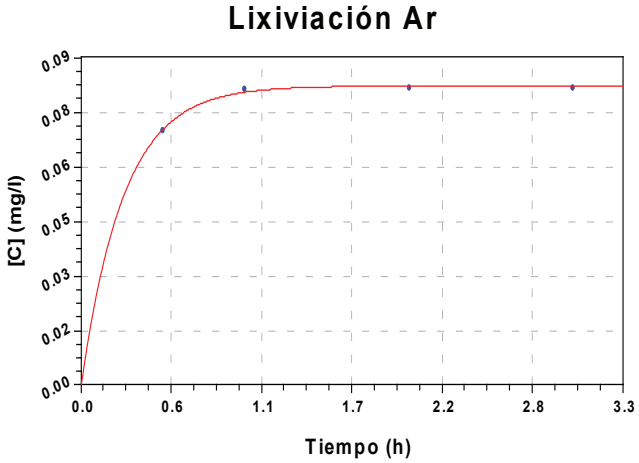


Figura 3. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 20%.

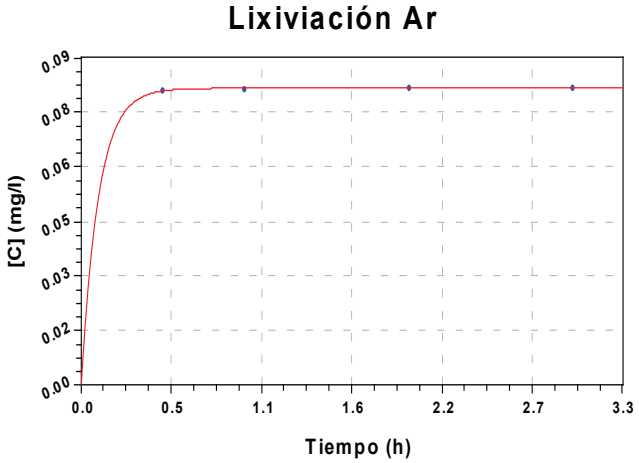


Figura 4. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 30%.

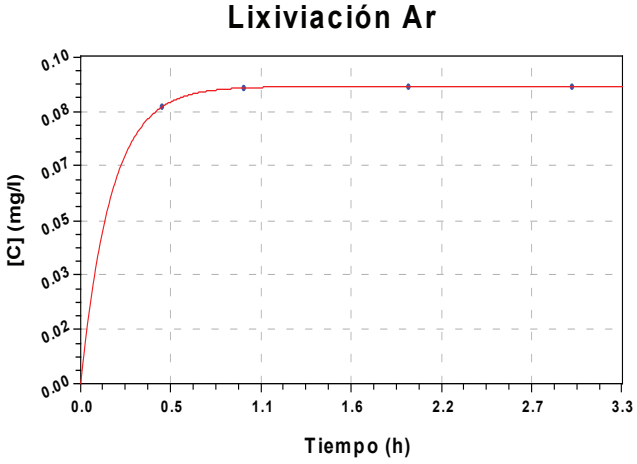


Figura 5. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 10%.

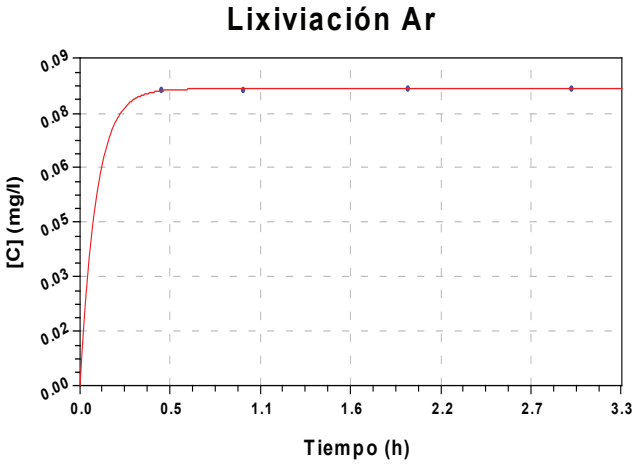


Figura 6. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 20%.

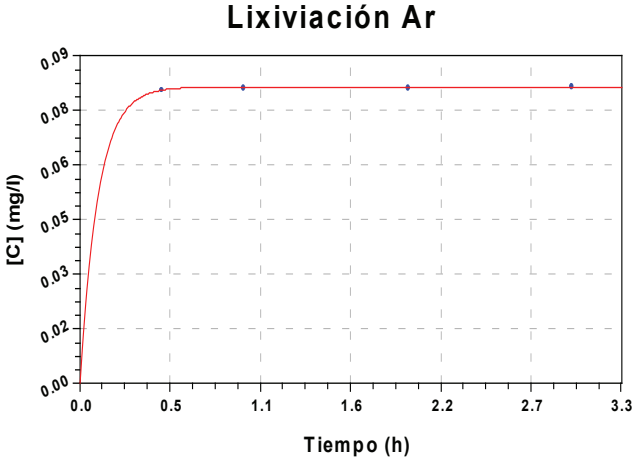
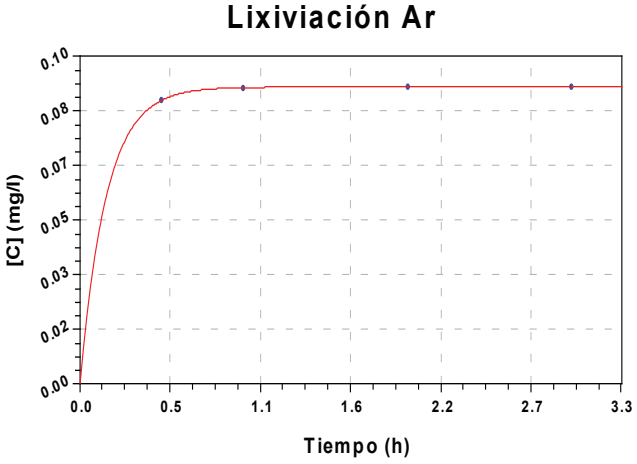


Figura 7. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: H_2SO_4 al 30%.



En general, la concentración de arsénico se incrementa con el tiempo de residencia de la mezcla cenizas-agente lixiviante como resultado de los mecanismos mixtos de transferencia de masa por disolución y difusión hasta alcanzar las condiciones estacionarias para tiempos mayores de 1 hora. Del análisis de los valores estacionarios que representan los máximos valores de arsénico separados por lixiviación ácida bajo las condiciones operacionales de los ensayos experimentales, se presentan así:

De las figuras 2-4, se destacan los valores estacionarios del arsénico en función del agente lixiviante, H_2SO_4, a las concentraciones 10%, 20% y 30% resultaron 0.08296 ppm, 0.08430 ppm y 0.08963 ppm. Si se comparan estos valores estacionarios del arsénico en soluciones ácidas con el valor máximo de 0.010 ppm como la concentración máxima de arsénico en agua potable según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los mismos se ubican entre 8 a 9 veces la concentración del arsénico en el lixiviado, representando las cenizas volantes un riego potencial a la salud pública. Los valores estacionarios de As en el lixiviado se incrementan con el grado de concentración del ácido H_2SO_4 en la fase acuosa, con los factores de enriquecimiento de 39.09%, 39.95% y 42.58% para las concentraciones de 10%, 20% y 30% de H_2SO_4 en fase acuosa, respectivamente. La variación de la concentración de As en la solución lixiviante se expresa por la ecuación de transferencia de masa en fase líquida,

En forma diferencial, $\frac{dC}{dt} = K_L a(C^* - C)$ (i)

En forma integrada, $C=C^*(1-e^{-kLa.t})$ (ii)

Donde, C^* es la concentración estacionaria o de equilibrio del As, ppm; $K_L a$ es el coeficiente de transferencia de masa del As en la fase líquida lixiviante, s^{-1}; t tiempo de residencia, s; C concentración de As en fase líquida a cualquier tiempo, ppm. El ajuste numérico con un error standard de 0.0007145 y un coeficiente de correlación de 0.9998517, señala los siguientes parámetros de transferencia; para el grado de concentración de 10% de H_2SO_4,

$C=0.08296(1-e^{-0.0645t})$ (iii)

mientras, para el grado de concentración de 20% de H_2SO_4,

$C=0.08430(1-e^{-0.1592t})$ (iv)

y para el grado de concentración del 30% de H_2SO_4,

$C=0.08963(1-e^{-0.09048t})$ (v)

En las figuras 5-7 se muestra la concentración del arsénico en la fase lixiviante del ácido H_2SO_4 como función del tiempo de residencia para la granulometría muestra original y temperatura de 45°C, con variación del grado de concentración del ácido. Los valores estacionarios como valores de equilibrio del proceso de lixiviación, a partir del ajuste numérico, resultaron 0.08367 ppm, 0.08496 ppm y 0.08996 ppm para las concentraciones de 10%, 20% y 30% de H_2SO_4 en fase lixiviante respectivamente, que resultan equivalentes a los factores de enriquecimiento de 39.65%, 40.19% y 42.62%. El ajuste numérico con un error standard de 0.0001512 y un coeficiente de correlación de 0.9999938, para el grado de concentraciones de 10% de H_2SO_4 a la temperatura de 45°C, revela los siguientes parámetros de transferencia,

$C=0.08367(1-e^{-0.6694t})$ (vi)

para el grado de concentración de 20% de H_2SO_4,

$C=0.08496(1-e^{-0.1519t})$ (vii)

y para grado de concentración del 30% de H_2SO_4,

$C=0.08996(1-e^{-0.1044t})$ (viii)

Las variables operacionales muestran las siguientes relaciones: la concentración del arsénico en la solución acuosa aumenta con el incremento del tiempo de residencia hasta los valores estacionarios,

aumenta con el incremento del grado de concentración del H_2SO_4 en la solución lixiviante, aumenta con el incremento de la temperatura de la solución lixiviante. La elevación de la temperatura favorece la mayor disolución y más altos coeficientes de Difusividad, observándose en consecuencia altas velocidades de lixiviación para tiempos cortos de residencia; así por ejemplo, para el tiempo de residencia de 30 minutos, la concentración del arsénico a la temperatura de 30°C es 0.0707 ppm, comparado con la concentración de 0.0831 ppm a la temperatura de 45°C.

Las tabla 4 presentan la concentración del arsénico en la solución ácida lixiviante para las cenizas volantes de tamaño -40+90 mesch, a las temperaturas de 30°C y 45°C respectivamente. Esta fracción de cenizas volantes corresponde a partículas granulares, con un contenido de arsénico de 0.1185 ppm, esto es, las partículas de cenizas de mayores tamaños con el menor contenido de As, según se indica en la tabla 2. La tabla muestra la variación de la concentración del As con el tiempo de residencia hasta estabilizarse hacia los valores estacionarios 0.04786 ppm, 0.05891 ppm y 0.0717 ppm para la temperatura de 30°C y los valores estacionarios de 0.04810 ppm, 0.05925 ppm y 0.07194 ppm para la temperatura de 45°C. Los factores de enriquecimiento de As en la solución lixiviante se incrementan apreciablemente con el incremento del grado de concentración del ácido, 40.39%, 49.71% y 60.50% a las concentraciones de 10%, 20% y 30% respectivamente y 30°C, mientras a la temperatura de 45°C resultaron 40.59%, 50.00% y 60.71%. El efecto del incremento de temperatura se aprecia al inicio del proceso de lixiviación sin mayores diferencias al final del mismo; así para ilustración, a 45°C, el factor de enriquecimiento es 60.71% comparado con 60.50% para la temperatura de 30°C, una diferencia de 0.21%, obviamente el grado de concentración de la solución lixiviante controla el proceso de separación sobre los efectos térmicos para el rango de estudio.

El coeficiente global de transferencia de masa para la fase líquida, K_La, disminuye con el incremento del grado de concentración del ácido, mientras aumenta con el incremento de la temperatura. A la temperatura de 30°C, los coeficientes, K_La, disminuyen así, 0.0775 s^{-1}, 0.06631 s^{-1} y 0.0614 s^{-1} para las concentraciones de 10%, 20% y 30% del ácido, respectivamente. Desde el enfoque de la teoría de Doble Resistencia, podría afirmarse que: i) el proceso de lixiviación es controlado por la fase líquida lixiviante para los tiempos cortos de transferencia y por la fase sólida de las cenizas volantes para los tiempos mayores a 1 hora y ii) el incremento del grado de concentración de la solución ácida lixiviante favorece el control de la fase líquida y al contrario, el incremento de la temperatura favorece el control de la fase sólida. El ajuste numérico de la concentración del As en la fase líquida lixiviante con un error standard de 0.0001058 y un coeficiente de correlación de 0.9999904, se expresa así para la temperatura de 30°C y 10% de ácido H_2SO_4,

$$C=0.04786(1-e^{-0.0775t}) \quad \text{(ix)}$$

mientras para 20% y 30%, respectivamente:

$$C=0.05891(1-e^{-0.06631t}) \quad \text{(x)}$$

$$C=0.0717(1-e^{-0.0614t}) \quad \text{(xi)}$$

Las tabla 5 presentan los resultados de lixiviación ácida para las cenizas volantes de tamaño -90+160 mesh, a las temperaturas de 30°C y 45°C respectivamente. Según se muestra en la tabla 1, la mayor cantidad de As se concentra en la fracción de cenizas volantes de menor tamaño, la porción pulverizada en los tamices -90+160 mesh. Las concentraciones de arsénico en la fase ácida lixiviante se incrementa como consecuencia de la mayor concentración de As en las cenizas volantes, representando las máximas concentraciones de As en comparación con los valores obtenidos para las otras fracciones de tamaño de las cenizas. El rango de las concentraciones de As en la solución ácida lixiviante a la temperatura de 30°C resultó entre 0.1662 ppm y 0.1723 ppm, mientras a la temperatura de 45°C resultó entre 0.1852 ppm y 0.1891 ppm, si se comparan con la concentración máxima de As en agua potable de 0.010 ppm, se destaca el riesgo potencial de contaminación a la salud pública que representan las ceni-

zas volantes expuestas a procesos naturales de lixiviación. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) clasifica el arsénico como cancerígeno en el grupo A debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud. La exposición a una concentración de arsénico de 0.05 ppm puede causar 31.33 casos de cáncer de la piel por cada 1000 habitantes.

El proceso de separación por lixiviación ácida de las cenizas volantes de tamaño -90+160 mesh exhibió los mayores valores de los factores de enriquecimiento de arsénico por parte de la solución ácida lixiviante para todas las granulometrías de las cenizas volantes. A 30°C, los factores de enriquecimiento resultaron 58.83%, 60.60% y 60.99% para las concentraciones del ácido H_2SO_4 de 10%, 20% y 30% respectivamente. Del análisis de los resultados anteriores se aprecia el mayor efecto atribuible al incremento de la temperatura, asociado al incremento de la solubilidad y del coeficiente de difusividad del arsénico a través de las partículas pequeñas de las cenizas volantes, mientras el efecto del incremento de la concentración de ácido H_2SO_4 es ligeramente apreciable entre 1.77% y 2.16%. El ajuste numérico para la concentración de As a la temperatura de 30°C se expresa así:

$C=0.1662(1-e^{-0.1474t})$ para 10% de H_2SO_4 (xii)

$C=0.1712(1-e^{-0.1647t})$ para 20% de H_2SO_4 (xiii)

$C=0.1723(1-e^{-0.1799t})$ para 30% de H_2SO_4 (xiv)

Mientras para la temperatura de 45 °C:

$C=0.1852(1-e^{-0.1131t})$ para 10% de H_2SO_4 (xv)

$C=0.1873(1-e^{-0.1811t})$ para 20% de H_2SO_4 (xvi)

$C=0.1891(1-e^{-0.1694t})$ para 30% de H_2SO_4 (xvii)

En las tablas 6-8 se presentan la concentración de arsénico en la fase del agente lixiviante, ácido clorhídrico HCl, como función del tiempo de residencia para las diferentes condiciones operacionales de granulometría, temperatura de mezcla y grado de concentración del ácido. La tabla 8 y en forma gráfica las figuras 8-13 corresponden al tamaño de partícula de la muestra original a las temperaturas de 30°C y 45°C. Del análisis de las figuras se destacan los siguientes resultados:

Figura 8. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 10%.

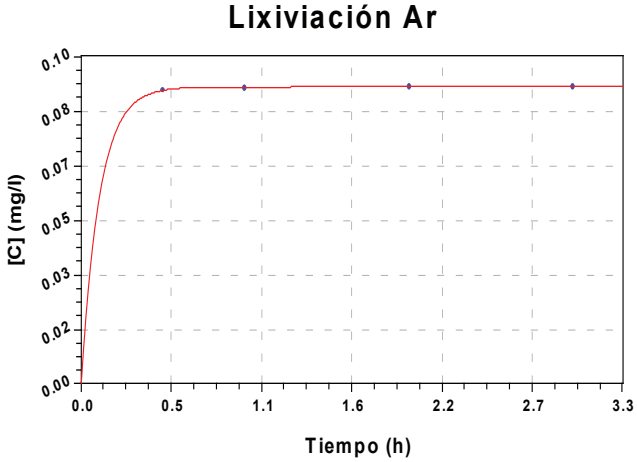


Figura 9. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 20%.

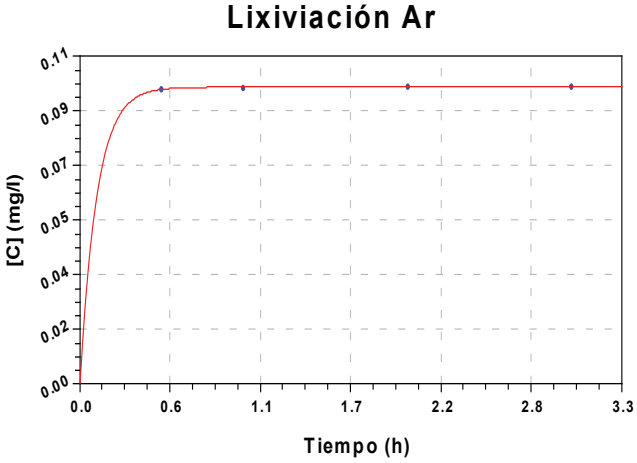


Figura 10. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 30°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 30%.

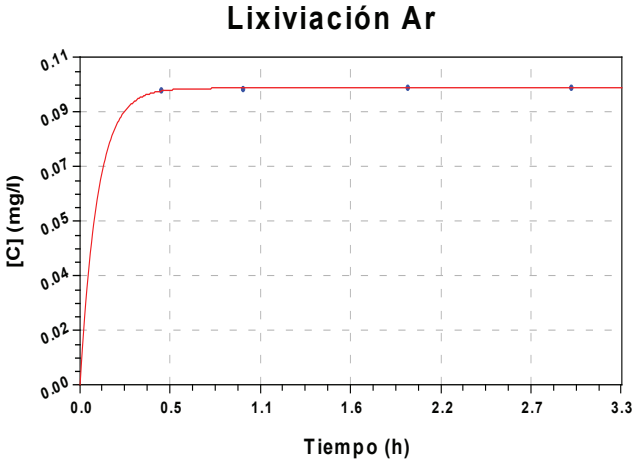


Figura 11. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 10%.

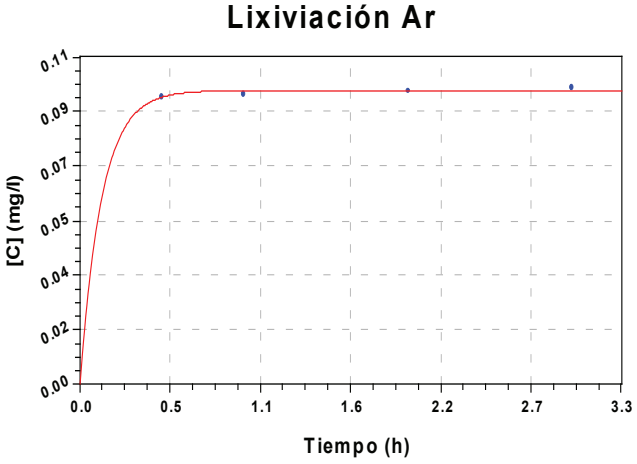


Figura 12. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 20%.

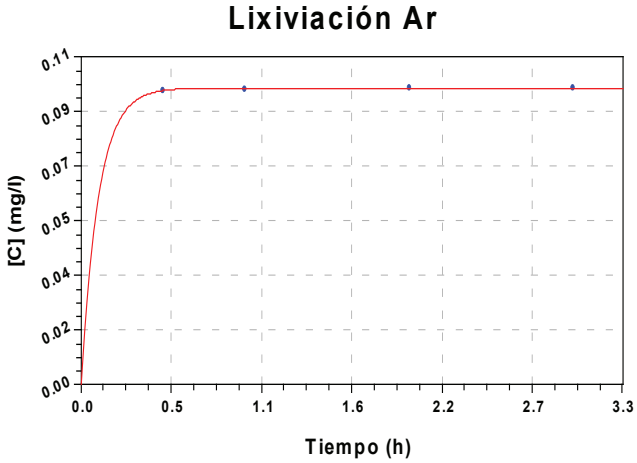
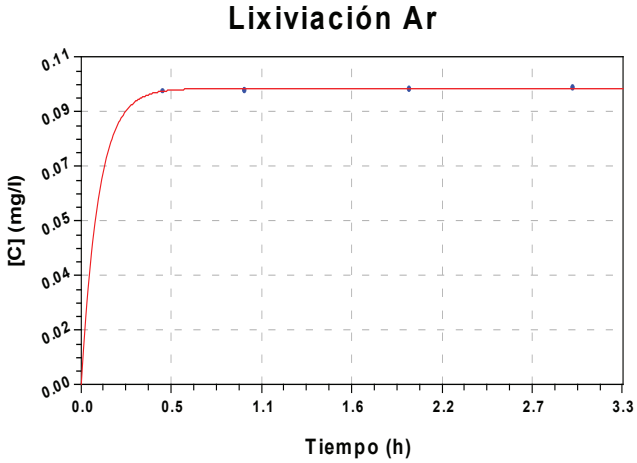


Figura 13. Concentración de arsénico versus tiempo de residencia temperatura 45°C, granulometría: muestra original y lixiviante: HCl al 30%.



i) La concentración de As en la fase lixiviante del ácido clorhídrico se incrementa de manera exponencial hasta el valor estacionario de equilibrio conforme al incremento del tiempo de residencia. A cada condición operacional de concentración de ácido, temperatura del sistema y la granulometría de las cenizas volantes la concentración del As se expresa por la ecuación de transferencia en la fase líquida, $C=C^{*}(1-e^{-kLa.t})$.

ii) Los factores de enriquecimiento de As en la fase lixiviante se incrementa con el aumento del grado de concentración del ácido, para la granulometría de tamaño original a 30°C, los valores estacionarios resultaron 0.0920 ppm, 0.0986 ppm y 0.0990 ppm a las concentraciones de 10%, 20% y 30% de HCl respectivamente, equivalente a los factores de enriquecimiento de 43.71%, 46.84% y 47.03%.

iii) La concentración de As en la solución lixiviante se incrementa con aumento de la temperatura del sistema. Así, para la granulometría de muestra original, los valores estacionarios resultaron 0.0975 ppm a 45°C en comparación con 0.0920 ppm a 30°C, con factores de enriquecimiento de 46,32% y 43.71% para el ácido clorhídrico al 10% de concentración. Los factores de enriquecimiento de As

en la solución lixiviante a la temperatura de 45°C se incrementan suavemente con el incremento del grado de concentración del ácido clorhídrico, 46.32%, 47.13% y 47.32% a las concentraciones de 10%, 20% y 30%, respectivamente.

iv) De la misma manera, como se distribuye el arsénico en las distintas fracciones de tamaño de las cenizas volantes las máximas concentraciones de As son generadas por la lixiviación ácida de las cenizas volantes de menor tamaño, fracciones pulverizadas de tamaño -90+160 mesh, las menores concentraciones de As son generadas por la lixiviación ácida de las cenizas volantes de mayor tamaño, fracciones granular de tamaño -40+90 mesh; las concentraciones intermedias de As se representan por la muestra de tamaño original.

v) Las concentraciones de As en la lixiviación ácida de la fracción pulverizada de tamaño -90+160 mesh, resultaron con los siguientes valores estacionarios 0.2020 ppm, 0.2060 ppm y 0.2070 ppm a 30°C, mientras a 45°C: 0.2118 ppm, 0.2122 ppm y 0.2125 ppm. Los factores de enriquecimiento de As en la solución lixiviante, resultaron 71.50 %, 72.92% y 73.27% a 30°C para las concentraciones de 10%, 20% y 30% del ácido HCl y 74.97%, 75.12% y 75.22% a 45°C, correspondientemente.

vi) Los resultados comparativos entre los agentes lixiviantes, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, en atención a las condiciones estacionarias y factores de enriquecimiento del As en solución, demuestran que el ácido clorhídrico reporta mayor separación de As desde las cenizas volantes. Así, a 30°C y 30% de HCl la concentración estacionaria es 0.2070 ppm con un factor de enriquecimiento de 73.27% comparando con 0.1726 ppm y 61.09% para H_2SO_4. Para 45°C, los valores resultan 0.2125 ppm y 75.22% para HCl comparado con 0.1900 ppm y 67.25%.

Conclusiones

Del análisis de resultados se derivan las siguientes conclusiones.

i) Las cenizas volantes presentan una granulometría mayoritaria distribuida entre las fracciones de tamaño, dadas por los tamices -40+90 mesh y -90+160 mesh. La concentración de arsénico en la muestra original es 0.2105 ppm; 0.1185 ppm en la granulometría -40+90 mesh y 0.2825 ppm en la granulometría -90+160 mesh.

ii) De la misma manera como se distribuye el arsénico en las distintas fracciones de tamaño de las cenizas volantes, las máximas concentraciones de As son generadas por la lixiviación ácida de las cenizas volantes de menor tamaño, la fracción pulverizada de tamaño -90+160 mesh; las menores concentraciones de As son generadas por la lixiviacion ácida de las cenizas volantes de mayor tamaño, la fracción granular de tamaño -40+90 mesh.

iii) De los resultados comparativos entre los agentes lixiviantes, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, en atención a las concentraciones estacionarias y factores de enriquecimiento del As en solución, demuestran que el ácido clorhídrico genera la mayor separación del arsénico desde las cenizas. Así a 30°C, 30% de HCl, la concentración estacionaria es 0.2070 ppm con un factor de enriquecimiento de 73.27% comparado con 0.1726 ppm y 61.09% para 30% de H_2SO_4.

iv) El efecto de las variables operacionales sobre la lixiviación ácida de las cenizas volantes:

   a) La concentración de As en la solución lixiviante se incrementa de manera exponencial con el incremento del tiempo de residencia hasta el valor estacionario de equilibrio;

   b) La concentración de As en la solución lixiviante se incrementa con el aumento del grado de concentración del ácido y con el aumento de la temperatura del sistema.

Referencias bibliográficas

1. Samit, JM; Dominic, F; Curriero, FC; Coursac, I; Zeper, L. Fine particulate air polution and mortality in 20 US Cities, 1989-1994, N Engl J Med 343, 1742-1749, 2000.
2. García, C; González, J.; Machado, A.; Rincón, C.; Villalobos, E. y Martínez K. Concentración de Vanadio y Níquel en cenizas volantes por combustión controlada. Revista Inter-Ciencia, Vol. 29, No. 9, 504-509, Septiembre 2004.
3. U. S. Enviromental Protection Agency, National air Pollutant Emission Trends, 1990-1992, EPA – 454/R-93-032. Research Triangle Park, NC. US. Enviromental Protection Agency, 1992.
4. Huffman, G.; Huggins, F., Shah N. and Huggins, R. Characterization of fine particulate matter produced by combustión of residual fuel oil. J. Air & Waste Management Assoc. Vol. 50, pages 1106-1114, July 2000.
5. Qafoku, N.P.; Kukier, H.; Summer, M.E; Miller, W.P. and Radcliffe, D.E. Arsenate displacement from fly ash in amorded soils. Water, air and soil poluttion, Vol. 114, No. 1-2, pages 185-198, 1999.
6. Arguelles, J; Ojeda, M. Remoción del arsénico en las cenizas volantes producto de la combustión del fuel oil. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, 119 páginas, Octubre 2007.
7. Piña, L.; Dorante, E.; García, C.; González, J. y Martínez, K. Efecto de las variables operacionales en la lixiviación ácida de metales pesados presentes en el fly ash. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 27, No. 1, 33-40, 2004.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Sistema de control en modo deslizante para regular la posición y la velocidad de un motor de corriente directa

Ernesto Cornieles y Jacobo Ramírez

Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Control, Maracaibo, Edo. Zulia. Venezuela. Apartado 10259, Tele-Fax: +58-261-4128753

cornieles.ernesto@gmail.com, ramirezjcb@hotmail.com

Recibido. 13-09-2013 Aceptado: 14-04-2015

Resumen

En el presente trabajo se aplica la teoría de un Sistema de Control en Modo Deslizante, para regular la posición y velocidad de un motor de corriente directa. El desarrollo matemático que permitirá diseñar el controlador será expresado a través de instrumentos virtuales en el diagrama de bloques del software de LabView®, que permite manipular variables en tiempo real gracias a la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024E de la National Instruments. Todos los datos ingresan y salen del computador de forma analógica vista fisicamente como una señal de voltaje. Esta inserción de datos es posible a través de un tacómetro digital que interpreta los pulsos del obturador óptico diseñado como rad/seg para el caso de la velocidad o en radianes para la posición. La salida de datos se adecua a través de un circuito amplificación y un circuito de potencia que regularán la tensión de excitación. Con la finalidad de obtener una mayor precisión en la posición del eje del motor el controlador aplicará una tensión constante cuyo valor no excede los 2 voltios en los terminales del motor. La velocidad del motor no excederá los 190 rad/seg, es decir, trabajará en un rango de tensión comprendido entre 0 y 10 voltios en terminales, con esto se garantizará el óptimo funcionamiento del circuito de potencia sin alcanzar sus límites de operación. Todos los resultados estarán basados en ensayos realizados a un motor de corriente directa el cual estará sometido a distintos requerimientos de velocidad y posición.

Palabras clave: Modo deslizante, controlador, labview®, Motor

Sliding mode control to regulate the speed and position of a motor of direct current

Abstract

In the following paperwork the theory of Sliding Mode Control is applied, to regulate the position and speed of a motor of direct current. The mathematical development that will allow designing the controller will be expressed through virtual instruments in the block diagram of the LabView® software, which allows to manipulate variables in real time thanks to the card of data acquisition DAQ6024E of the National Instruments. All the data is entered and got from the computer in an analogical form seen like a voltage signal. This insertion of data is possible through a digital tachometer that it interprets the pulses of the designed optical stopper as rad/seg for the case of the speed or in radians for the position. The exit of data is adapted through the amplification circuit and a power circuit that regulate the excitation voltage. With the purpose of obtaining a greater precision in the position of the

axis of the motor the controller applied a constant tension whose value does not exceed the 2 volts in the terminals the motor. The engine speed will not exceed 190 rad/seg, so it may work in a rank of tension between 0 and 10 volts in terminals, with this was guaranteed the optimal operation of the circuit of power without reaching his limit of operation. All the results will be based on tests made to a motor of direct current which will be put under different requirements from speed and position.

Key words: Sliding Mode, controller, Labview®, Motor

Introducción

Los sistemas de control automatizados han jugado un papel vital en el avance de la ciencia en general, especialmente en el área de ingeniería. Sus innumerables aplicaciones crecen día a día para facilitar y optimizar los procesos de producción industriales. Los sistemas de Control por Modo Deslizante (CMD) representan una parte fundamental de la teoría de sistemas no lineales propuestos en la antigua Unión Soviética por S.V. Emelyanov del Institute of Control Sciences, e Itkis V.A. Utkin (HUNG 1993, UTKIN 1977-1978, ITKIS 1976). Esta teoría consiste en el empleo de acciones de control conmutadas o discontinuas sobre una o varias superficies de conmutación. La teoría de CMD se ha combinado con la teoría de sistemas inteligentes tales como lógica difusa, redes neuronales, razonamiento probabilístico, algoritmos fanáticos, entre otros. La presente investigación parte de la necesidad de implementar un CMD para regular la posición y velocidad de un motor de corriente directa [1]. Es importante mencionar que este motor de imanes permanentes no esta acoplado a encoders u otros sistemas de frenado, por lo que la precisión en el control de posición resulta un verdadero reto. Para tal fin, se implementará el software LabView®, donde se diseñará una lógica controladora que a través de la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024, creara la interfaz computador -usuario -motor, para regular los parámetros anteriormente mencionados [2].

Características del sistema

• *Selección del Motor*

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó un motor de corriente directa y de imanes permanentes con las características presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Placa característica del motor de corriente directa.

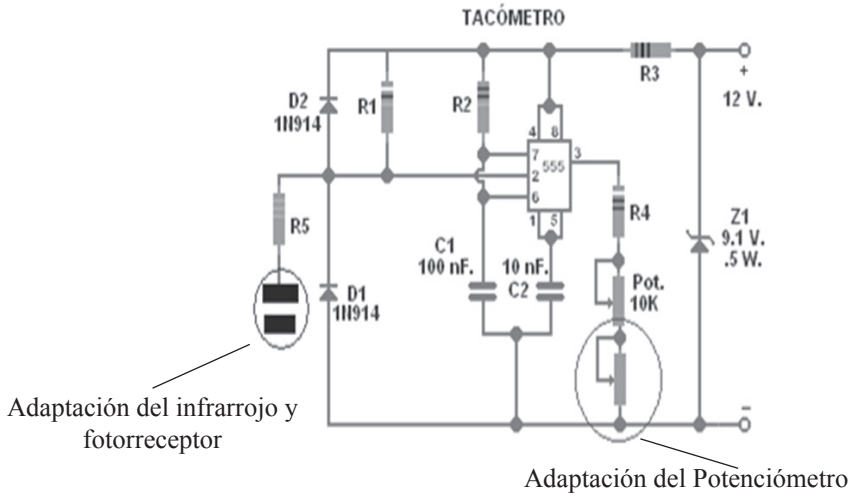
MARCA	Dayton Electric MFG (Imán Permanente)	
MODELO	4Z529	
CLASE	B	
HP	**VOLT. ARMADURA**	**RPM**
1/6	12v	1800
1/3	24v	4200
$I_{ARMADURA}$ DC 16ª		
Torque 6.38 lbs.pulg		

• *Construcción del tacómetro.*

Para la selección del tacómetro apropiado fue necesario conocer las características de la tarjeta de adquisición DAQ 6023E. Es decir, entradas y salidas, de señales analógicas o digitales, de tensión o corriente que maneja el dispositivo.

Se realizó la adaptación de un tacómetro electrónico diseñado para automóviles, sustituyendo la entrada por dispositivos opto-electrónicos (infrarrojo y fotorreceptor) y la salida analógica del miliamperímetro por un potenciómetro de modo que se obtengan lecturas de tensión. Para ello se implementó el circuito electrónico mostrado en la figura 1.

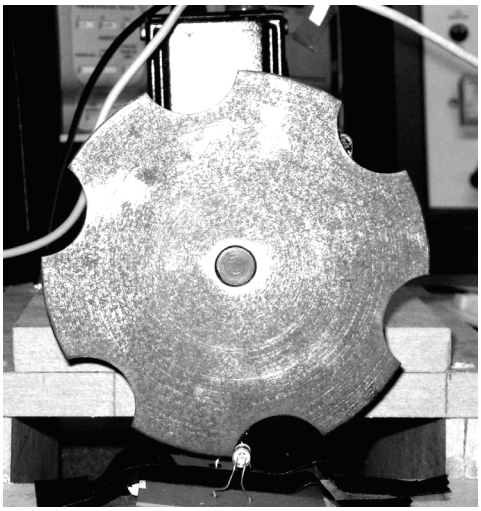
Figura 1. Diagrama del tacómetro electrónico.



• *Diseño del obturador óptico.*

Inicialmente se consideró acoplar un disco con una sola perforación por el cual atravesará la señal del infrarrojo y de de este modo obtener un pulso por cada revolución que diera el eje motor, esta consideración se realizó tomando en cuenta que en el diseño original del tacómetro realiza la excitación para el disparo del integrado 555 mediante los platinos que se encuentran en el motor de arranque del vehículo. Pero con este primer diseño no se podrán realizar lecturas a altas velocidades (pérdidas de precisión), por lo que se decidió realizar 6 perforaciones de igual tamaño y equidistantes una de otra en el disco como se muestra en la figura 2; con lo que se logrará realizar lecturas a diferentes velocidades sin tener que realizar una nueva modificación del tacómetro.

Figura 2. Obturador óptico hecho de acero con seis perforaciones para realizar el muestreo de pulsos y determinar la posición y velocidad del motor.



• *Selección de los Transistores.*

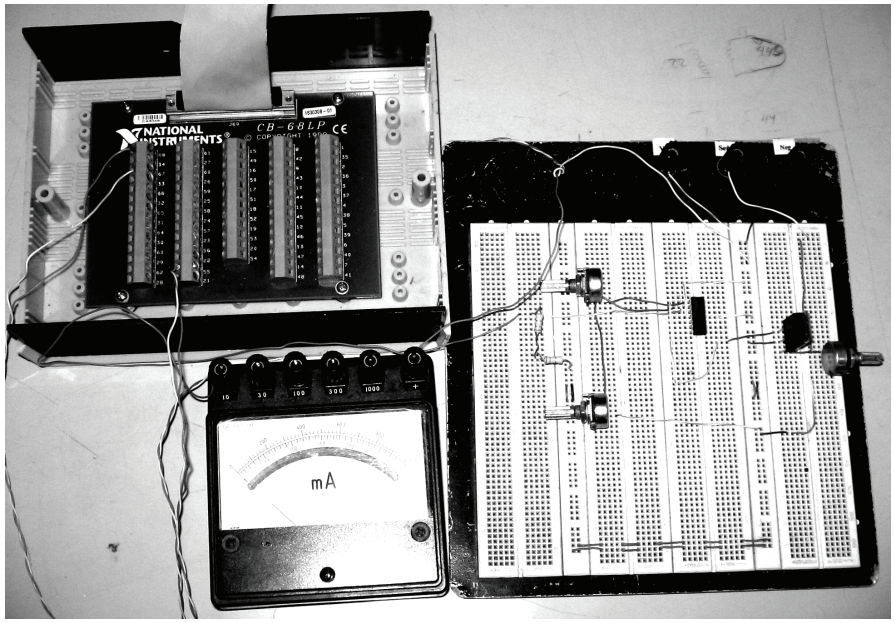
Se utilizaron transistores de potencia complementarios de silicio modelo TIP3055, figura 3. Estos transistores soportan una corriente máxima de 15A y una tensión de colector emisor igual a 70V en corriente directa.

Figura 3. Transistor de Silicio TIP3055.

• *Circuito de amplificación.*

Fue necesaria la adaptación de un circuito amplificador, figura 4, a la salida de la tarjeta de adquisición con la finalidad de obtener los niveles de tensión requeridos por los transistores para realizar el disparo de los transistores por sus respectivas bases.

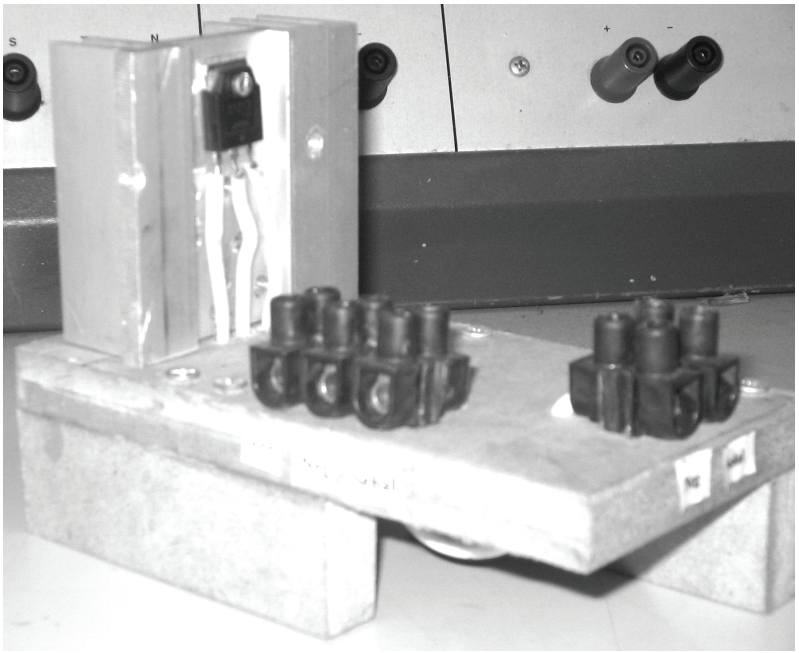
Figura 4. Circuito amplificador de tensión armado sobre un proto board. Relación de amplificación 1:2.



• *Circuito de potencia.*

El circuito de potencia figura 5, consta de un transistor de potencia BJT de tipo (npn) cuyo disparo por la tensión base proviene de la salida del circuito amplificador, este circuito será el encargado de suministrar la corriente necesaria para el arranque y funcionamiento del motor.

Figura 5. Circuito de potencia. Construido con un solo transistor de potencia D1213 (TIP3055), con características Vn = 30v e In = 16A.



Estructura del controlador en modo deslizante

El desarrollo matemático que permitirá diseñar el controlador será expresado a través de instrumentos virtuales mediante el software de LabView® [2], que permite manipular variables en tiempo real gracias a la tarjeta de adquisición de datos DAQ6024E de la National Instruments. En este diseño todos los datos ingresan y salen del computador de forma analógica vista físicamente como una señal de voltaje [1]. Esta inserción de datos es posible a través de un tacómetro digital que interpreta los pulsos del obturador óptico acoplado al eje del motor. La salida de datos se adecúa a través de un circuito amplificación y de potencia que regularán la tensión de excitación. Los resultados estarán basados en ensayos realizados a un motor de corriente directa que estará sometido a distintos requerimientos de velocidad y posición.

Partimos de la siguiente ecuación:

$$LT\frac{d^2X_{(t)}}{dt^2}+(L+T)\frac{dX_{(t)}}{dt}+X_{(t)}=KU_{(t)} \tag{1}$$

Esta ecuación describe el comportamiento del proceso y queda expresada directamente en función de la entrada salida del proceso X(t), el tiempo muerto L, la constante de tiempo T, con respecto a la ganancia enfática del proceso K y a la salida del controlador U(t).

El Modelo Matemático del Sistema y determinación de los parámetros del motor viene dada por:

$$y_{(t)}=\left[A+Be^{-p_1t}+Ce^{-p_2t}\right]1_{(t)} \tag{2}$$

donde, A>0, B<0 y C=-B, con:

$$y_{1(t)}=A+Be^{-p_1t} \qquad y_{2(t)}=Ce^{-p_2t} \tag{3}$$

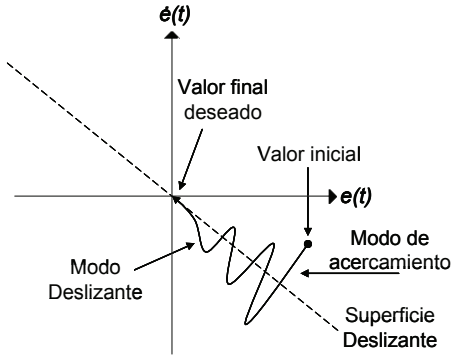
En un CMD[1], la superficie de deslizamiento se expresa mediante la ecuación (4):

$$S_{(t)} = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int_0^t e_{(t)} dt \tag{4}$$

Donde:

e(t) representa el error, n es el orden del sistema y es un parámetro de ajuste, que define S(t). Este término seleccionado para determinar la función del sistema en la superficie deslizante [1,3]. La meta, ver figura 6, es lograr que la variable controlada sea igual al valor de referencia esto se logra haciendo el error e(t) igual a cero junto con sus derivadas. De esta manera nuestro controlador se hace parte la familia de controladores PID donde se disminuye el error medido entre la señal de referencia a la entrada del proceso y el valor de la variable obtenida a la salida del proceso

Figura 6. Interpretación gráfica del control en modo deslizante.



Teniendo en cuenta la ecuación (4), se procede a diseñar la Ley de Control, a partir de la estructura del Sistema Deslizante 1]. La acción de control total;

$$U_{(t)} = U_{c(t)} + U_{d(t)} \tag{5}$$

dependerá de una parte continua Uc(t) y una parte discontinua Ud(t):

$$U_{c(t)} = f\left[X_{(t)}, R_{(t)} \right] \tag{6}$$

$$U_{d(t)} = K_d \frac{S_{(t)}}{\left| S_{(t)} \right| + \delta} \tag{7}$$

Donde R(t) es una función que depende de la variable del proceso X(t) y del valor de referencia, y es responsable de mantener la variable sobre la superficie deslizante, y la parte discontinua Ud(t), es la responsable de alcanzar la superficie, generalmente incorpora elementos no lineales [1,3]. Al analizar un Sistema de Control en Modo Deslizante de Primer Orden, considerando el tiempo muerto, obtenemos para $n = 2$,

$$S_{(t)} = \frac{de_{(t)}}{dt} + \lambda_1 e_{(t)} + \lambda_0 \int_0^t e_{(t)} dt \tag{8}$$

donde la salida del controlador o la acción de control se obtiene utilizando la ecuación (1), donde L es el tiempo muerto en segundos y T la constante de tiempo en segundos [1].

$$U_{c(t)} = \left(\frac{LT}{K}\right)\left[\left(\frac{L+T}{LT} - \lambda_1\right)\frac{dX_{(t)}}{dt} + \frac{X_{(t)}}{LT} + \lambda_0 e_{(t)}\right] \tag{9}$$

donde:

$$\lambda_1 = \frac{L+T}{LT} \quad \lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4}$$

Lo que finalmente nos permite obtener la expresión de la *ley de control*:

$$U_{(t)} = \left(\frac{LT}{K}\right)\left[\frac{X_{(t)}}{LT} + \lambda_0 e_{(t)}\right] + K_d \frac{S_{(t)}}{\left|S_{(t)}\right| + \delta} \tag{10}$$

La parte discontinua del controlador viene dada por la expresión (7) y se determina a partir de valores estimados y utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Kd = \frac{0.51}{|K|}\left[\frac{T}{L}\right]^{0.76} \tag{11}$$

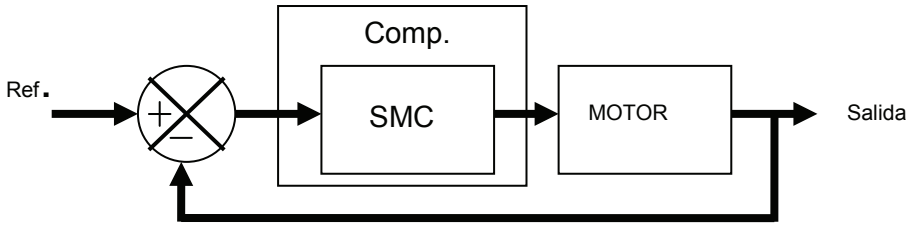
$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_d\lambda_1) \tag{12}$$

El control total en modo deslizante viene dado por la expresión (5).

•*Diagrama de bloques utilizando el Sistema de Control en Modo Deslizante*

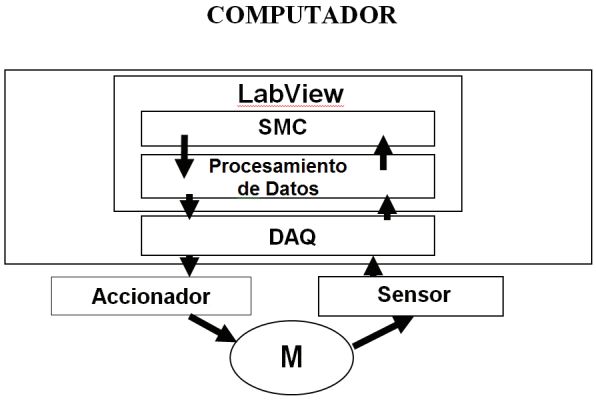
En la figura 7, se muestra el diagrama del sistema de control en modo deslizante

Figura 7. Diagrama de bloques implementando CMD para el control del motor.



En la figura 8 se muestra el sistema completo y la adquisición de datos utilizando unas tarjetas de adquisición de datos de tipo Labview®, un computador y un motor de corriente continua.

Figura 8. Arquitectura del Computador implementando CMD en el programa LabView.

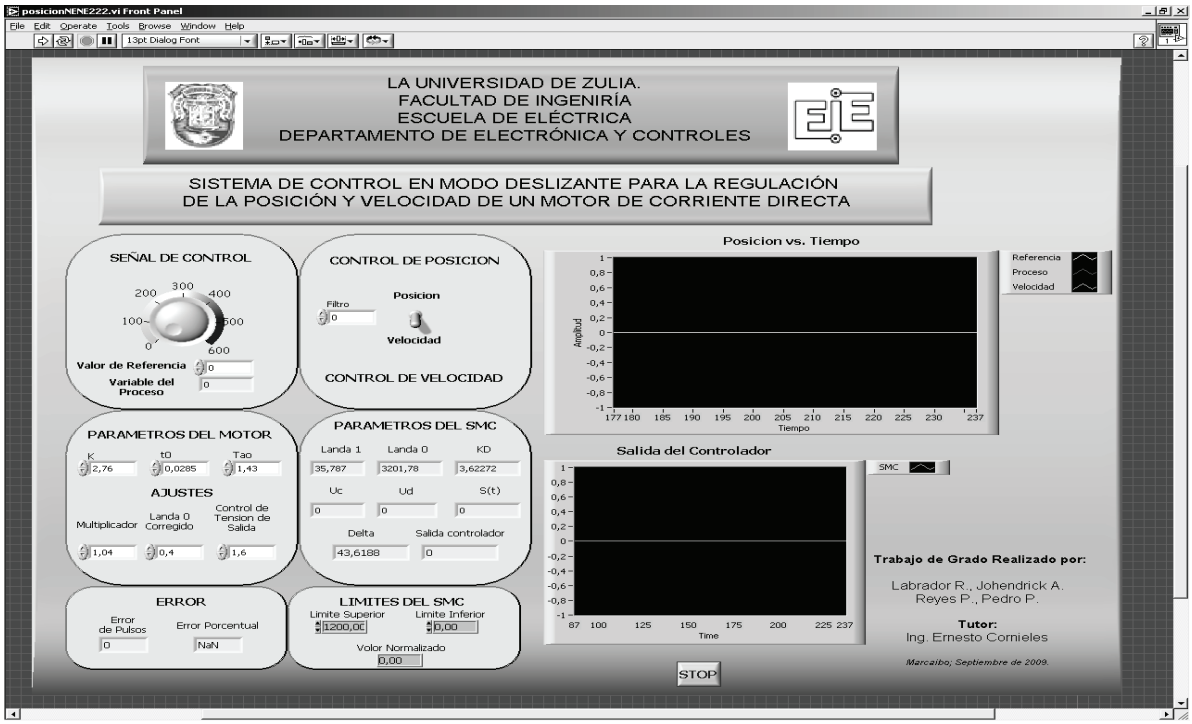


Descripción del software diseñado

• *Pantalla de trabajo del programa*.

Esta será la pantalla como se muestra en la figura 9, en el cual el usuario podrá acceder al programa. El panel de trabajo cuenta con una serie de controles para introducir los parámetros del motor, factor multiplicador (interpretar los pulsos como radianes), corrección del factor λ_0 y tensión de salida en la tarjeta de adquisición. Del mismo modo, se muestran unos indicadores donde se puede observar el cálculo de los diferentes factores que conforman la ley de control en modo deslizante; tales como: $U_{c(t)}$ (parte continua del controlador), $U_{d(t)}$ (parte discontinua del controlador), $S_{(t)}$ (superficie deslizante), K_D y δ que expresan la ley de control en forma porcentual (0 a100) y la salida del controlador [4,5].

Figura 9. Pantalla de trabajo del programa elaborada en LabView.



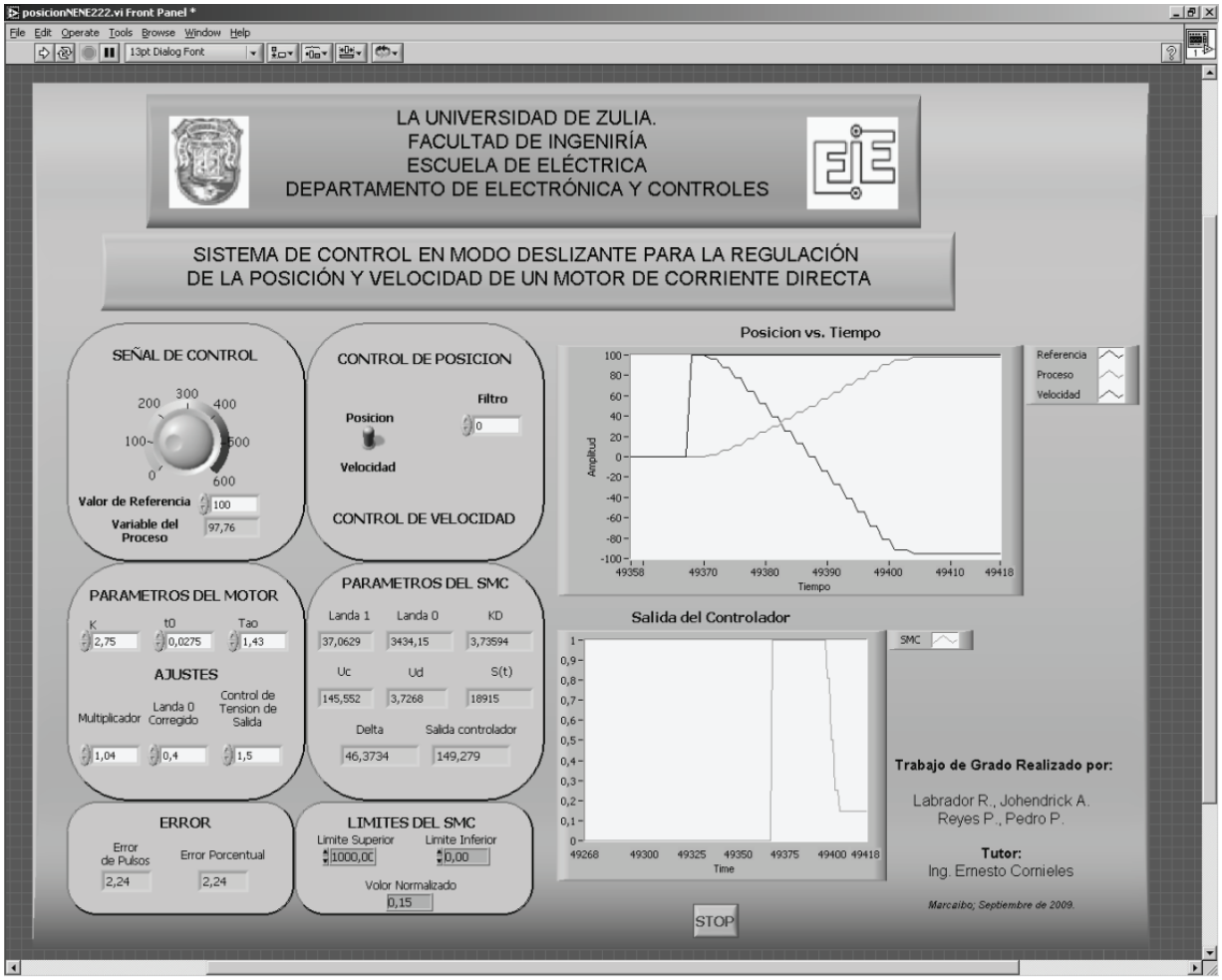
Resultados experimentales

• *Control de posición utilizando LabView®*

La posición en este sistema es medida en radianes para cual se interpretan los pulsos enviados por cada giro que realiza el eje del motor como radianes, cabe destacar que estas perforaciones hechas al obturador óptico están igualmente espaciadas ente sí.

Este ensayo consiste en observar el comportamiento del sistema al exigirle que se posicione a 100 radianes desde el reposo (0 radianes), mostrando en el panel de la figura 10, la experiencia realizada.

Figura 10. Ensayo de posición desde 0 a 100 radianes.



En la gráfica de Posición vs. Tiempo, se muestra el comportamiento del motor ante una señal de tipo escalón de amplitud 100 (Línea color Blanca). Partiendo del reposo el eje del motor adquiere un giro constante con lo cual se comienza a realizar el conteo de los pulsos, este comportamiento se expresa con la línea roja. Se observa que los pulsos disminuyen a medida que llega a la señal de referencia. Del mismo modo, se observa el comportamiento de la velocidad (Línea color Verde), el cual permanece constante y disminuye a medida que se acerca al valor de referencia (tiende a cero). Por otro lado, la gráfica de la Salida del Controlador anterior muestra la salida del control en modo deslizante, apreciando una señal similar a una onda cuadrada; esta analogía se debe al hecho de presentar un primer flanco positivo en el cual su valor cambia de 0 a 1 casi instantáneamente, luego alcanza el valor pico el cual se

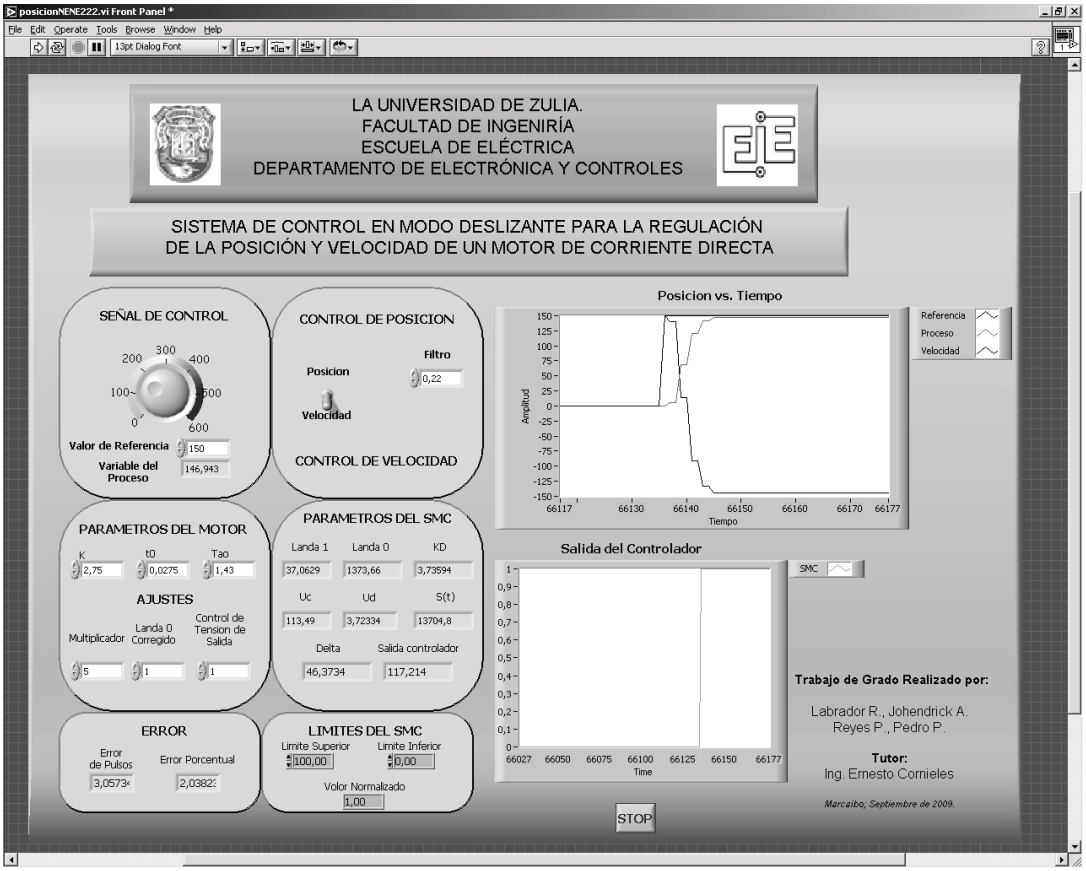
mantiene mientras se acumulan los pulsos necesarios para que la señal del proceso esté muy próxima a la señal de referencia y por último se aprecia un flanco negativo con una pequeña desviación debida a la acción de frenado aplicada por el motor (disminución de la velocidad), hasta que la señal de referencia y la del proceso se igualan.

- *Control de velocidad utilizando LabView®*

La velocidad en este sistema es medida en radianes por segundo para cual se interpretan los pulsos enviados por cada giro que realiza el eje del motor como radianes por una unidad de tiempo definida.

Este ensayo consiste en observar en la figura 11, el comportamiento del sistema al exigirle que alcance una velocidad de 150 rad/seg desde el reposo (0 rad/seg).

Figura 11. Ensayo de velocidad desde 0 a 150 radianes.



En la gráfica de Posición vs. Tiempo se muestra el comportamiento del motor ante una señal de tipo escalón de amplitud 150 rad/seg. (Línea Negra). Se observa que el motor alcanza la velocidad deseada casi de forma instantánea . Luego de alcanzado el valor deseado la tensión de alimentación del motor permanece constante. La línea azul de la gráfica representa la variación de la señal del proceso que se estabiliza simultáneamente con la velocidad. La velocidad del proceso presenta un comportamiento estable debido a la entonación del filtro sin embargo, se observa una pequeña distorsión para ciertos períodos de tiempo, esta distorsión de la onda se interpreta como variación de la señal de salida del controlador (Picos negativos en la señal de salida del controlador), como se muestra en la gráfica de la Salida del Controlador.

Conclusiones

El procedimiento utilizado para conocer las características y respuestas del proceso de un motor de corriente directa ante diferentes entradas permitió establecer de forma muy precisa el modelo matemático del sistema, con esto se logró determinar sus parámetros (ganancia propia del motor, tiempo muerto y tiempo de respuesta), de manera que se pudiera aplicar la ley de control deseada. Todas las entradas aplicadas consistieron en señales de tensión tipo escalón de diferentes amplitudes.

Se determinó una secuencia lógica de pasos que permitió desarrollar un diagrama de bloques que permita al usuario implementar este sistema en investigaciones posteriores, cada diagrama que se desarrolló esta dirigido a una función específica (reconocer el proceso como un sistema a lazo cerrado, conocer la lógica en la adquisición y envíos de señales con el software LabView® y mostrar cada etapa que componen el sistema a lazo cerrado). La representación del control en modo deslizante partió de la determinación de los parámetros del motor de corriente directa, seguidamente de la implementación de la señal de control considerando la parte continua y discontinua de dicha señal, del mismo modo se determinó la superficie deslizante para la variación del error (diferencia entre la señal de referencia y la variable de salida del proceso). Para construir la ecuación de control se implementó una serie de instrumentos virtuales del software LabView® los cuales permitieron interpretar las señales de entradas, procesarlas y expresarlas de modo que se pudieran representar las fórmulas matemáticas aplicadas al control en modo deslizante.

El diseño de una interfaz usuario-máquina se basó en el desarrollo de circuitos electrónicos de amplificación, potencia y adquisición (amplificador de tensión, transistores de BJT de potencia y tacómetro, respectivamente), bajo los cuales todas las señales puedan ser interpretadas de forma efectiva por el computador sin ocasionar daños a los equipos. Debido a las variaciones de tensión y giro que presentó el motor durante las pruebas se determinó que la entrada y salida de datos óptima para el sistema consistiría en señales analógicas, las cuales serán convertidas en señales digitales por el computador. Se desarrolló un panel de trabajo con un lenguaje de alto nivel, con la finalidad de hacerlo amigable y fácil de manipular por el usuario. En los ensayos realizados para el control de posición se pudo observar un comportamiento sobreamortiguado en la señal del proceso. Del mismo modo, se observó que la amplitud de la señal de referencia es directamente proporcional al tiempo de respuesta del controlador; y la señal de salida del controlador presentó una forma similar a una onda cuadrada; donde el pico de la onda coincide con el tiempo de operación del motor. En la regulación de velocidad, la forma de onda de la señal del proceso presentó un comportamiento sobreamoritguado con un tiempo de respuesta mucho menor (casi instantáneo), en comparación con los ensayos de variación de posición. Esto se debe principalmente a que el rango de operación de la tensión de excitación fue ajustado entre 0 y 10 voltios, mientras que para el control de posición esta tensión era constante menor a 2 voltios. La señal de salida del controlador, presentó en este caso, una forma de onda similar a un escalón, es decir, parte desde cero y cambia de valor de forma instantánea y este valor se mantiene durante la simulación lo que representa que la tensión en terminales es invariante.

Referencias bibliográficas

1. Oscar Camacho y Rubén Rojas, *A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes*. Transactions of the ASME, Vol. 122, Dic 2000
2. National Instruments® (2000). *daq 6023/6024e/6025e user manual*. http://www.ni.com (marzo 2008)
3. Carlos Saavedra, *Desarrollo De Un Algoritmo Para Simulación De Un Controlador En Modo Deslizante Para Procesos Lineales Y No Lineales De Primer Y Segundo Orden De Una Variable*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia.Maracaibo, junio 2005

4. John Dorsey, *Sistemas de Control Continuos y Discretos, Modelado, Identificación, Diseño e Implementación*. Mc. Graw Hill. Atlanta, Georgia, sept 2004

5. Kaya Ibrahim, Sliding *Mode Control Of Stable Chemical Processes*. Facultad de Ingenieria y Arquitectura. Diyarbakur, Turquia, mars 2005

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Evaluación fisicoquímica y fitoquímica de granada (*Punica granatum* L.)

Johanna Raga Carreño[1*], Zulay Mármol Pérez[1], Evelyn Pérez Pérez[2], Gisela Paéz[1] y Karelen Araujo[1]

[1]Laboratorios de Tecnología de Alimentos y Fermentaciones Industriales. Departamento de Ingeniería Bioquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, Apartado 526. Maracaibo 4001-A, estado Zulia, Venezuela.

johannaraga@gmail.com.* Autor de correspondencia.

[2]Centro Socialista de Investigación y Desarrollo Frutícola-Corpozulia. Km 27 de la vía hacia San Rafael de El Moján, Mara, estado Zulia, Venezuela 4044.

evelyncpp@gmail.com

Recibido: 16-12-2014 Aceptado:14-04-2015

Resumen

La granada (*Punica granatum* L.) es un rubro mundialmente reconocido por sus excelentes propiedades antioxidantes debido a la variada gama de compuestos bioactivos que posee. Sin embargo, en Venezuela existe poca información sobre este frutal, sobre todo en lo referente a su potencial como fuente antioxidante, lo que indica que se está subvalorando un cultivo atractivo que podría permitir la apertura de otros mercados comerciales. Con el fin de conocer las características de nuestros materiales y determinar si son competitivos con los materiales de las regiones productoras y exportadoras se consideró necesario evaluar las propiedades físico y fitoquímicas de granada. Esas propiedades incluyeron acidez iónica (3,54), acidez titulable (0,55 g ácido cítrico·100^{-1} mL), sólidos solubles totales (13,3ºBx), vitamina C (10,45 mg ácido ascórbico·100^{-1}mL), azúcares reductores (13,32g·100 mL^{-1}), contenido de polifenoles (147,14 mg·ácido gálico·100 mL^{-1}), flavonoides totales (22,28 mg catequina·100 mL^{-1}) y capacidad antioxidante (54,61 mg·ácido gálico·100 mL^{-1}). Los resultados demuestran que este rubro presenta propiedades físico y fitoquímicas dentro del rango encontrados para aquellos propios de zonas productoras por excelencia.

Palabras clave: *Punica granatum* L., polifenoles, flavonoides, fitoquímicos, compuestos bioactivos

Evaluation of physical and phytochemical properties of the granada (*Punica granatum* L.)

Abstract

The Granada (*Punica granatum* L.) is an item recognized worldwide for its excellent antioxidant properties due to the wide range of bioactive compounds possessing. However, in Venezuela there is little information on this fruit, especially with regard to its potential as an antioxidant source, which indicates that you are underestimating an attractive crop that could allow opening in other commercial markets. In order to know the characteristics of our materials and determine whether they are competitive with materials producing and exporting regions was considered necessary to evaluate the physical and phytochemical properties of Granada. These properties included ion acidity (3.54), titratable acidity (0.55g citric acid·100^{-1}mL) , total soluble solids (13.3 ºBx), vitamin C (ascorbic

acid 10.45 mg·100^{-1} mL) , reducing sugars (13.32g·100 mL^{-1}), polyphenol content (147.14 mg gallic acid·100 mL^{-1}), total flavonoids (22.28 mg catechin·100 mL^{-1}) and antioxidant capacity (54.61 mg gallic acid·100 mL^{-1}). The results demonstrate that this item presents physical and phytochemical properties inside the range found for those own of producing excellent zones.

Key words: *Punica granatum* L, polyphenols, flavonoids, phytochemicals, bioactive compounds

Introducción

La granada (*Punica granatum* L.) es un rubro milenario al cual se le atribuyen excelentes propiedades sensoriales y antioxidantes, además de destacada actividad biológica con efecto antibacteriano, antiviral, anticancerígeno, antimutagénico, entre otros, por lo que es ampliamente usada en la medicina popular para el tratamiento de enfermedades de diferente índole [1-3].

La granada se consume fresca, es dulce, con ligera acidez y agradable. La parte comestible corresponde a un 50% del peso total del fruto, 40% corresponde a los arilos y 10% semillas. Los arilos contienen 85% de agua, 10% de azúcares totales (fructosa y glucosa) y 1,5% de pectina, ácidos orgánicos (ácido ascórbico, cítrico, málico), vitaminas, minerales y compuestos bioactivos o fitoquímicos. Estos últimos son los responsables de la excelente actividad biológica que presenta este rubro [1, 4, 5].

El granado es un frutal con agradables propiedades sensoriales y es una excelente fuente de vitamina C y E. Estas bondadosas características ha permitido la apertura de un nuevo mercado en la producción de diversos productos a partir del frutal como: jugos, néctares, tés, suplementos alimenticios, vinos, licores, píldoras, cremas faciales y aceites corporales [6]. Sin embargo, en Venezuela no se ha tecnificado este cultivo debido a la escasa información existente sobre este rubro. Considerando las bondades anteriormente expuestas se observa con preocupación que se está subvalorando un cultivo promisorio el cual podría permitir la apertura de otros mercados comerciales.

Esta investigación presenta la evaluación fisicoquímica y fitoquímica de la parte comestible (arilos) de la granada. Esta información permitirá darle valor agregado al fruto para determinar si es una buena fuente de compuestos bioactivos. Esto permitirá promover la importancia de activar la producción de granada para conectarlo a la agroindustria, y generar empleos, producir productos alimenticios, cosméticos, entre otros.

Parte Experimental

Material vegetal.

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon frutos de granada (*Punica granatum* L.) suministrados por el Centro Socialista de Investigación y Desarrollo Frutícola y Apícola (CESIS-Apícola) ubicado en el municipio Mara del Edo. Zulia, kilómetro 27 de la carretera a San Rafael del Moján, sector El Caimito. Los frutos fueron cosechados al alcanzar la madurez fisiológica, lo cual correspondió al índice sensorial: color de la cáscara, en el período Diciembre 2013-Enero 2014.

Procesamiento de las muestras de granada

Los frutos de granada al ser cosechados, se almacenaron en el laboratorio de postcosecha por unas horas para eliminar el calor campo. Las granadas con defectos mecánicos (quemaduras, roturas, magulladuras y cortes en la cáscara) y fitosanintarios fueron descartadas. Posteriormente fueron lavados con agua de chorro y desinfectados con una solución clorada y finalmente, enjuagados con agua destilada.

Posteriormente, los frutos se partieron y separó de forma manual la cáscara de los arilos. Los arilos fueron colocados en un procesador para obtener el jugo, el cual fue filtrado a través de gasa para eliminar las partículas suspendidas. Al jugo filtrado de granada se le determinó acidez iónica (pH), aci-

dez titulable, vitamina C, sólidos solubles totales (ºBrix), azúcares reductores, polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante.

Parámetros fisicoquímicos.

El peso de las frutas frescas fue determinado en una balanza digital (Ohaus) con una precisión de 0,01g.

La acidez iónica fue medida en la muestra homogeneizada y filtrada empleando pHmetro (Termo, Orion 3 star), COVENIN 1315-79 [7].

Los sólidos solubles totales se determinaron con un refractómetro (Baush & Lomb) a 20ºC, usando agua destilada para calibrar. COVENIN 924-83 [8]. Los resultados fueron expresados en ºBrix.

La determinación de la Vitamina C se realizó aplicando la norma COVENIN 1295-82 [9] y se expresó en mg ácido ascórbico por 100 mL de muestra.

Para la acidez titulable se siguió el procedimiento descrito por Akbarpour et al. [1]. Para ello, 1mL de zumo de granada se transfirió a un balón volumétrico de 25 mL y se aforo con agua destilada previamente hervida. Seguidamente, se valoró potenciometricamente con solución de hidróxido de sodio 0,1 N estandarizada. Los resultados fueron expresados en g ácido cítrico por 100 mL jugo

La determinación de azúcares reductores se basó en el método propuesto por Miller [10]. Este método colorimétrico se basa en el uso del reactivo DNS, la cuantificación se hace espectrofotométricamente a una longitud de onda de 550 nm y cuya curva de calibrado se construye a partir de una solución patrón de glucosa. Para la cuantificación fue necesario hacer una dilución en agua 1:101 v/v. Los resultados fueron expresados en gramos por 100 mL jugo.

Parámetros fitoquímicos.

La determinación de polifenoles se basó en el método reportado por Floegel et al. [11], basado en el método descrito por Singleton y Rossi [12] con algunas modificaciones. Para ello, una alícuota del jugo diluido en una relación 1:11 (v/v) en agua, se añadió a un balón volumétrico, el cual contenía un volumen medido de agua, seguidamente se añadió 1mL del reactivo de Folin- Ciocalteu. Después de 5 min, se agregó 10 mL de carbonato de sodio (7g/100 mL) y se aforó hasta 25 mL. La muestra se almacenó en oscuridad a temperatura ambiente por 1,5 h. La absorbancia de la muestra se medió a una longitud de onda de 750 nm. La concentración de polifenoles se calculó a través de la curva estándar de ácido gálico. El contenido de polifenoles del material vegetal se expresó en mg equivalente de ácido gálico (GAE)·100 mL^{-1} de jugo.

El contenido de Flavonoides se determinó de acuerdo al método colorimétrico reportado por Floegel et al. [11], modificado. Una alícuota del jugo diluida en una relación 1:11 (v/v) en agua, se transfirió a un balón volumétrico, el cual contenía un volumen medido de H_2O destilada. A tiempo cero, se agregó 0,3 mL de una solución de $NaNO_2$ (5%m/v). Después de 5 min., se añadió 0,3 mL de $AlCl_3$ (10% m/v). A los 6 min., se agregó 2 mL de NaOH 1 M y se aforó hasta 10 mL. Inmediatamente, se midió la absorbancia a una longitud de onda de 510 nm. La concentración de flavonoides totales en la muestra se calculó a través de la curva estándar de catequina. El contenido de flavonoides totales del material vegetal se expresó en mg equivalente de catequina (CE)·100 mL^{-1} de jugo.

La capacidad antioxidante se determinó mediante el método del catión-radical $ABTS^{\bullet+}$ [ácido 2,2´azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonico)] reportado por Miller et al. [13]. El catión $ABTS^{\bullet+}$ se generó químicamente por la reacción de una solución de ABTS 7mM con una solución de persulfato de potasio 2,45 mM, ambas soluciones en una proporción 1:1 (v/v), por un periodo de incubación de 16h , en oscuridad y a a temperatura ambiente (± 25ºC). Posterior a la formación del radical $ABTS^{\bullet+}$, esta se

diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de 0,6-0,70±0,02 a 750 nm (longitud de onda de máxima absorción). Esta absorbancia del ABTS corresponde a (Abs radical) t_{0min}, seguidamente, se añadió 20µL del jugo diluido en una relación 1:26 (v/v) en agua y se dejó reaccionar por 5 min. en oscuridad para proceder a la lectura espectrofotométrica (Abs radical + antioxidante) t_{5min}. [14]. La capacidad antioxidante se calculó a través de la curva estándar de ácido gálico. La capacidad antioxidante del material vegetal se expresó en mg equivalente de ácido gálico (GAE)·100 mL^{-1} de jugo.

La precisión analítica de todas las determinaciones se evaluó a través de las desviaciones estándares relativas (DER) para un total de tres repeticiones por muestra.

Resultados y Discusión de Resultados

Parámetros físicos

La Tabla 1 presenta los parámetros físicos de los frutos de granada, donde se observa un contenido de arilos de aproximadamente 50%, valor que se encuentra dentro del rango reportado por Akbarpour et al. [1]. Estos investigadores evaluaron 12 cultivares de granada obtenidos de diferentes regiones de Irán, encontrando un rango de 46,30-72,06% en el contenido de arilos. Por otra parte, este valor concuerda con el reportado por Viuda-Martos et al. [4], donde la parte comestible corresponde al 50% del masa total de la fruta y consiste de 40% arilos y 10% semillas.

Tabla 1. Parámetros físicos de los frutos de granada.

Porcentaje Humedad de cáscara (%)	66,53
Cáscara fresca (%)	39,52
Porcentaje de arilos (%)	49,66
Porcentaje de semilla (%)	11,12

Por otra parte, se encontró un contenido de semilla de aproximadamente 10%, valor que se encuentra dentro del rango reportado por Akbarpour et al. [1], el cual oscila entre 7,67-21,57%.

En cuanto al contenido de cáscara fresca se obtuvo un valor de aproximadamente 40%, valor similar al reportado por Akbarpour et al. [1] y Ventura et al. [15]. Por su parte, en las cáscaras de los frutos se obtuvo un promedio de 66,53% de humedad. El contenido de cáscara fresca indica que casi la mitad del peso del fruto corresponde a la cáscara, por lo tanto, se deben buscar alternativas para obtener un aprovechamiento de este recurso vegetal que pudiera constituirse en un subproducto agroindustrial que se puede caracterizar fitoquímicamente y de esta manera darle valor agregado, ya que su no adecuada disposición podría representar un problema ambiental.

Parámetros fisicoquímicos

En nuestro país lamentablemente no tenemos tecnificado el cultivo de granada, lo cual indica, considerando las bondades anteriormente expuestas que se esta subvalorando un cultivo promisorio. A continuación se presenta la Tabla 2, donde se muestran los parámetros químicos del fruto de granada.

Acidez iónica (pH)

El valor promedio de pH fue 3,54, el cual se encuentra dentro del rango 2,75-4,14 reportado por Akbarpour et al. [1]. Este valor de pH corresponde al gusto ácido de la fruta. En cuanto a este parámetro, Ozgen et al. [16] obtuvieron un rango de pH entre 2,98 y 3,68 al evaluar seis diferentes cultivares en la región Mediterránea de Turkia.

Tabla 2. Parámetros químicos y fitoquímicos de la parte comestible del fruto de granada.

pH	3,54±1,12
SST	13,3±0,75
Acidez titulable (g AC100^{-1}mL)	0,55±2,0
Relación SST/acidez titulable	24,18
Vitamina C (mg AA·100^{-1}mL)	10,45±7,73
Azúcares reductores (g·$100mL^{-1}$)	13,32±2,04
Polifenoles totales (mg·AG$100mL^{-1}$)	147,14±1,94
Flavonoides totales (mg CAT·$100mL^{-1}$)	22,28±3,96
Capacidad antioxidante (mg·AG$100mL^{-1}$)	54,61±6,2
%Inhibición ABTS	34,86

SST sólidos solubles totales, AC ácido cítrico, AA ácido ascórbico, AG ácido gálico, CAT catequina

Sólidos solubles totales SST

En la caracterización del jugo de granada se obtuvo un valor de sólidos solubles totales ligeramente superior a 13ºBx, valor cercano al reportado por Mercado et al. [17] para granada criolla de Apaseo, donde encontraron un rango de SST de 14-16ºBx. Por su parte, Ozgen et al. [16] evaluaron seis cultivares de granada, los rangos oscilaron entre 14,7 y 19,9ºBx

Vitamina C

El valor promedio de vitamina C encontrado en el material evaluado fue 10,45 mg AA·100 mL^{-1}, valor ligeramente superior al reportado por Akbarpour et al. [1] para el cultivar "Shishe-Kap" (9,68mg AA·100^{-1} mL) e inferior que el obtenido para el cultivar "Tabrizi" (17,45 mg AA·100^{-1} mL). Sin embargo, el contenido de ácido ascórbico encontrado en esta investigación (0,010g AA·100 mL^{-1}) es semejante al reportado por Ozgen et al. [16] para el cultivar "Tatli", el cual presentó un contenido de ácido ascórbico de 0,016 g AA·100 mL^{-1}.

Acidez titulable

La acidez titulable encontrada en el jugo de granada fue de aproximadamente 0,55%. Las variedades de granado según la acidez del jugo (expresado como ácido cítrico) y de acuerdo a los Descriptores de Mars reportado por Melgarejo et al. [19] se clasifican en las categorías dulce, agridulce y ácida. Las variedades dulces con una acidez menor a 0,9% se destinan principalmente para consumo en fresco. En la categoría agridulce, las variedades que presentan una acidez entre 1 y 2%, son utilizadas para la producción de bebidas refrescantes y las variedades que pertenecen a la categoría de frutos ácidos, presentan una acidez mayor al 2% suelen ser empleados en la agroindustria para la extracción de ácido cítrico. En función de esto, el material vegetal analizado en esta investigación se encuentra de la categoría dulce.

Por su parte, Ozgen et al. [16] reportaron en seis cultivares de granada valores de acidez titulable entre 0,5-3,8% de ácido cítrico, por lo tanto, estos cultivares ofrecen arilos agrios, agridulce y dulces. Estos investigadores reportaron un contenido de ácido cítrico correspondiente al 92,2% de los ácidos totales, seguido del ácido málico con un 6,2% y 1,7% corresponde al ácido ascórbico. Como se observa el ácido cítrico es el ácido que se encuentra naturalmente en mayor proporción en la granada. Por otro lado, este rubro no se puede considerar una rica fuente de vitamina C ya que su contenido de ácido ascórbico es bajo.

Relación sólidos solubles/acidez

La relación sólidos solubles/acidez titulable es usada para identificar la calidad de las frutas y jugos, ya que define el sabor "taste" de la fruta. Melgarejo et al. [19] estableció una clasificación de tres categorías según el valor de la relación sólidos solubles/acidez: variedades dulces, agridulces y agrias. Las variedades dulces, son aquellas que se encuentran en el rango de sólidos solubles/acidez de 31-98; las variedades agridulces, entre 17-14 y de 5-7 para las variedades agrias o ácidas.

En este sentido, Shwartz et al. [20] evaluaron los cambios fisicoquímicos durante el proceso de maduración de dos variedades de granada locales en Israel denominadas Rosh-Hapered y Wonderful. Ellos observaron que durante el proceso de maduración los sólidos solubles totales tienden a aumentar y la acidez titulable (expresada en % de ácido cítrico) tiende a disminuir, reportando valores de 8,8 a 25 en la primera semana del proceso de maduración y valores de 32 al final de la maduración. Por otra parte, Akbarpour et al. [1] reportan un rango entre 5,57 y 50,24 para los diferentes materiales evaluados.

Ozgen et al. [16] clasifican al material "Tatli' como dulce ya que posee una relación SST/acidez titulable de 29,4. El material vegetal evaluado en esta investigación presentó una relación de 24,18. Esto demuestra que nuestro material se encuentra dentro de los estándares de sabor dulce reportado en las regiones potencialmente productoras y exportadoras de granada.

Azúcares reductores

La granada presentó una concentración de azucares reductores de 13,02 g glucosa·100 mL^{-1}. Akbarpour et al. [1] reportaron un contenido de azucares reductores entre 13,89 g·100 mL^{-1} para el cultivar "Abdandan" y 29,83g·100 mL^{-1} para el "Naderi". Comparando el contenido de azucares reductores obtenido en esta investigación con el reportado por Akbarpour et al. [1], se observa que el material vegetal evaluado se encuentra cercano al rango. Así mismo, Ozgen et al. [16] reportaron un valor de 13,2 g azúcares reductores·100 mL^{-1}, valor muy cercano al encontrado en esta investigación.

Parámetros fitoquímicos

Polifenoles totales

El contenido de polifenoles totales obtenido en el jugo de arilos de granada fue 147,14 mg·AG·100mL^{-1} o 1471,4 mg AG·L^{-1}. Sin embargo, Tezcan et al. [21] evaluaron siete jugos de granada comerciales, encontrando contenidos de polifenoles de 2602-10086 mg AG·L^{-1}. Como se observa, el contenido polifenoles en este trabajo está por debajo del rango reportado por Tezcan et al. [21]., esto puede deberse a que a nivel industrial el jugo de granada se extrae de la fruta entera, es decir, cáscara y arilos, por lo tanto, el contenido de polifenoles aumenta ya que la cáscara de granada posee una concentración de polifenoles diez veces más alta a la reportada para pulpa de granada, según lo reporta Li et al. [22] Tzulker et al. [23] y Çam et al. [24].

Por otro lado, Ozgen et al. [16] reportaron una rango de concentraciones de polifenoles de 1245-2076 mg AG·L^{-1} para jugo fresco de arilos de granada pertenecientes a seis cultivares de la región Mediterránea de Turquía; observándose que el material vegetal evaluado en esta investigación se encuentra dentro del rango de concentraciones reportado por Ozgen et al. [16].

Flavonoides totales

Las frutas y las hortalizas son fuentes ricas en vitaminas, minerales, fibra y fitoquímicos (compuestos bioactivos no nutrientes). Aunque en general todos estos componentes trabajan en forma conjunta para producir algún beneficio, los fitoquímicos, tales como los flavonoides han atraído gran interés

para los productores de alimentos procesados y las industrias cosméticas y farmacéuticas debido a sus características antioxidantes [25].

Los flavonoides se encuentran en todas las plantas, pero están localizados principalmente en las vacuolas de las células de la piel de frutas y hortalizas, aportando parte del sabor y del color; la mayoría son solubles en agua y no son sintetizados por el cuerpo humano ni producidos sintéticamente [25].

El jugo de granada arrojó una concentración de flavonoides totales de 22,28 mg CAT·100 mL de jugo, lo cual representa aproximadamente un 15% del contenido de polifenoles totales. El restante porcentaje de polifenoles se debe a la diversa gama de compuestos de naturaleza fenólica presente en la granada, entre los que se puede mencionar los isómeros de punicalagina, taninos, derivados del ácido elágico, proantocianidinas y antocianinas [4].

Capacidad Antioxidante

La capacidad antioxidante obtenida en el jugo de arilos de granada fue 54,61 mg AG·100mL^{-1}, arrojando un porcentaje de inhibición 34,86%. Por su parte, Tabaraki et al. [18] encontraron un porcentaje de inhibición del radical DPPH entre 60,12 y 83,52% para extractos etanólicos-acuosos de cáscaras de granada secas. En esta investigación, el porcentaje de inhibición no resulta bajo al ser comparado con los resultados obtenidos por Tabaraki et al. [18] debido a que esta diferencia se debe principalmente a la composición fitoquímica del material vegetal estudiado. En este sentido, Tzulker et al. [23] compararon la capacidad antioxidante del jugo de arilos frescos con el jugo de arilos extraídos de la fruta completa, encontrando que la capacidad antioxidante de este último fue más elevada (de 2 a 20 veces más alta) debido a que la cáscara de granada posee punicalagina, la cual exhibe alta actividad antioxidante.

Por otro lado, Tezcan et al. [21], encontraron porcentajes de inhibición del DPPH entre 25,19 y 67,46% en diferentes jugos comerciales de granada. Como se puede observar el porcentaje de inhibición obtenido en el jugo de granada evaluado en esta investigación se encuentra dentro del rango reportado por estos investigadores. Es necesario destacar que los valores de inhibición que arrojan los diferentes métodos de determinación de capacidad antioxidante pueden sobre o subvalorar ligeramente la medición debido a las diferencias propias de cada método, por lo cual, es conveniente comparar valores basados en el mismo método de determinación.

La actividad antioxidante de la granada puede estar relacionada a los diversos compuestos fenólicos presentes entre estos destacan, isómeros de punicalagina, derivados de ácido elágico y antocianinas (delfina, cianidina y pelargonidina). Estos compuestos son conocidos por sus propiedades para neutralizar radicales libres y para inhibir la oxidación lipídica *in vitro* [4].

Conclusiones

Las variables fisicoquímicas determinadas pH (3,54), acidez titulable (0,55 g ácido citrico ·100^{-1} mL), sólidos solubles totales (13,3ºBx), azúcares reductores (13,32g·100 mL^{-1}) y vitamina C (10,45 mg ácido ascorbico·100^{-1} mL) demuestran que los materiales cultivados en esta zona geográfica exhiben excelentes atributos organolépticos al ser comparado con los materiales de los países productores y exportadores del rubro, lo cual, permite asegurar que es un cultivo promisorio para ser explotado y activar la manufactura de productos alimenticios, cosméticos y farmacológicos a partir del mismo. La caracterización fitoquímica; contenido de polifenoles (147,14 mg·ácido gálico·100 mL^{-1}), flavonoides totales (22,28 mg catequina·100mL^{-1}) y capacidad antioxidante (54,61 mg·ácido gálico·100 mL^{-1}) permite enfatizar que la granada es una rica fuente de nutrientes y compuestos bioactivos beneficiosos para la salud. Razón por la cual, se debe promocionar las bondades que ofrece esta fruta.

Agradecimientos

Se agradece al Centro Socialista de Investigación y Desarrollo Frutícola y Apícola (CESIS-Apícola) de CORPOZULIA por el apoyo prestado a esta investigación.

Referencias bibliográficas

1. Akbarpour V., Hemmati K. y Sharifani M. Physical and chemical properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit in maturation stage. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., Vol. 6, Nº. 4, (2009), 411-416.
2. Corao-Méndez G., García M., Rondón M., Borges L. y Cova J. Cambios histológicos en la piel de ratones expuestos al pericarpio de la granada. Rev. Fac. Farm. Vol. 51, Nº. 1, (2009), 15-19.
3. Rodríguez Chanfrau J., González M. y López Armas M. Desarrollo de un proceso tecnológico a escala de laboratorio para la extracción de polifenoles totales del fruto de la *Punica granatum* L. Revista Cubana de Plantas Medicinales. Vol. 47, Nº. 2, (2013), 252-263.
4. Viuda-Martos M., Ruiz-Navajas Y., Fernández-López J., Sendra E., Sayas-Barberá E. y Pérez-Álvarez J. Antioxidant properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses obtained as co-product in the juice extraction. Food Research International, Vol. 44, (2011), 1217-1223.
5. Martínez-Ramírez A., Contreras-Esquivel J. y Belares-Cerda R. Extracción de polifenoles asistida por microondas a partir de *Punica granatum* L. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. Vol. 2, Nº. 4, (2010).
6. De la Cruz Quiroz R., Rodríguez R., Contreras J., Aguilar C., Aguilera-Carbó A. y Prado L. La granada: fuente de potentes agentes bioactivos. CIENCIACIERTA. Vol. 7, Nº. 25 (2011).
7. COVENIN Norma Venezolana, Alimentos, Determinación del pH (acidez iónica). (1979) 1315-79.
8. COVENIN Norma Venezolana, Primera revisión. Frutas y productos derivados. Determinación de sólidos solubles por refractometría. (1984) 924-83.
9. COVENIN Norma Venezolana. Primera revisión. Alimentos. Determinación de ácido ascórbico (vitamina C). (1982) 1295-82.
10. Miller G. Use of DinitrosaIicyIic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. Analytical Chemistry, Vol. 31, Nº. 3, (1959), 426-428.
11. Floegel A., Kim D., Chung S., Koo S. y Chun O. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. J. Food Compos. Anal. Vol. 24, (2011), 1043-1048.
12. Singleton V. y Rossi J. Colorimetry of total phenolic with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. Am J Enol Vitic. Vol. 16, (1965), 144-158.
13. Miller, N., Rice-Evans, C., Dvis M., Gopinathan V. y Milner A. A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring antioxidant status in premature neonates. Clin. Sci. Vol. 84, (1993), 407-412.
14. Kim D., Seung W. y Chang L. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. Food Chem. Vol. 81, (2003), 321-326.
15. Ventura J., Alarcón-Aguilar F., Roman-Ramos R., Campos-Sepulveda E., Reyes-Vega M., Boone-Villa V. D., Jasso-Villagómez E. y Aguilar C. Quality and antioxidant properties of a reduced-sugar pomegranate juice jelly with an aqueous extract of pomegranate peels. Food Chemistry, Vol. 136, (2013), 109-115.

16. Ozgen M., Durgaç C., Serçe S. y Kaya C. Chemical and antioxidant properties of pomegranate cultivars grown in the Mediterranean region of Turkey. Food Chemistry, Vol. 111, (2008), 703-706.

17. Mercado Silva E., Mondragón Jacobo C., Rocha Peralta L. y Álvarez Mayorga B. Efectos de condición del fruto y temperatura de almacenamiento en la calidad de granada roja. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol. 2, Nº. 3, (2011), 449-459.

18. Tabaraki R., Heidarizadi E. y Benvidi A. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of pomegranate (Punica granatum L.) peel antioxidants by response surface methodology. Separation and Purification Technology, Vol. 98, (2012), 16-23

19. Melgarejo, P., Salazar D. y Artes F. Organic acids and sugar composition of harvested pomegranate fruits. European Food Research and Technology, Vol. 211, Nº. 3, (2000), 185-190.

20. Shwartz E., Glazer I., Bar-Ya'akov I., Matityahu I. y Bar-Ilan I. Changes in chemical constituents during the maturation and ripening of two commercially important pomegranate accessions. Food Chemistry, Vol. 115, (2009), 965-973.

21. Tezcan F., Gültekin-Özgüven M., Diken T., Özçelik B. y Bedia Erim F. Antioxidant activity and total phenolic, organic acid and sugar content in commercial pomegranate juices. Food Chemistry, Vol. 115. N º. 3, (2009), 873-877.

22. Li Y., Guo C., Yang J., Wei J., Xu J. y Cheng S. Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract. Food Chemistry. Vol. 96, (2006), 254-260.

23. Tzulker R., Glazer I., Bar-Ilan I., Holland D., Aviram M. y Amir R. Antioxidant activity, polyphenol content, and related compounds in different fruit juices and homogenates prepared from 29 different pomegranate accessions. J. Agric. Food Chem., Vol. 55, (2007), 9559-9570.

24. Çam M. y Hisil Y. Pressurised water extraction of polyphenols from pomegranate peels. Food Chemistry, Vol. 123, (2010), 878-885.

25. Ochoa C. y Ayala A. Los Flavonoides: Apuntes generales y su aplicación en la industria de alimentos. Ingeniería y competitividad. Vol. 6, Nº. 2, (2004), 93-104.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Cuantificación y caracterización de los residuos de alimentos del comedor central estudiantil de la Universidad del Zulia

Karina Martínez, John Sánchez, Yuleidi Raga, Zulay Mármol, Elsy Arenas, Cateryna Aiello Mazzarri

Laboratorios de Tecnología de Alimentos y Fermentaciones Industriales,
Departamento de Ingeniería Bioquímica, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería.
Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo 4002-A, estado Zulia, Venezuela.

caiello@fing.luz.edu.ve

Recibido: 23-01-2015 Aceptado: 14-04-2015

Resumen

La búsqueda de materias primas de bajo costo y fácil adquisición para uso como sustratos biotransformables constituye uno de los retos más interesantes de la biotecnología actual. Se evaluó la generación de residuos de alimentos del Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia, su composición fisicoquímica y posibles usos. Los residuos se recolectaron diariamente de 200 bandejas, tomadas al azar, durante siete semanas, se separaron, pesaron y clasificaron en carbohidratos, proteínas, y frutas-verduras. Se cortaron, mezclaron, esterilizaron y almacenaron a -15°C. Al finalizar cada semana las muestras se mezclaron hasta homogeneizar y se caracterizaron. Se encontró que de las 20.000 bandejas servidas por semana, se genera más de 1 tonelada de residuos de alimentos, clasificados como 63% carbohidratos, 14% proteínas y 23% frutas-verduras.Los residuos presentaron 65,79% de humedad, 34.21% de sólidos totales (96% materia orgánica), 25,99% de azucares totales, 7,34% de glucosa, 40,4% de almidón, 13,68% de proteínas, 6,99% de grasas, así como minerales que le confieren un alto potencial para su utilización como sustrato para la producción de metabolitos de interés con mayor valor agregado. Además, tienen pH promedio de 5,53 y baja acidez titulable (0.352%) que permitiría el crecimiento de gran cantidad de especies de microorganismos.

Palabras clave: Residuos de alimentos, residuos orgánicos, nutrientes, caracterización, sustratos no convencionales.

Quantification and characterization of food residues from the student central dining of the University of Zulia

Abstract

The search for inexpensive and readily available raw materials that can be used as substrates is one of the most interesting challenges in modern biotechnology. The generation, physicochemical composition, and possible applications of the food residues from the Student Central Dining of University of Zulia were evaluated. The residues collected daily from 200 trays, taken randomly, during seven weeks, were separated, weighted and classified

into carbohydrates, proteins, and fruits-vegetables. Then, were shredded, mixed, sterilized, and stored at -15ºC. At the end of each week, samples collected daily were mixed until homogeneous consistency and characterized. An average of 20000 trays was served per week, and over 1 ton of food wastes were generated (63% carbohydrates, 14% proteins and 23% fruits-vegetables). Food waste had 65.79%, moisture content, 34.21% total solids (96% organic matter), 25.99% of total sugar, 7.34% glucose, 40.4% starch, 13.68% protein, 6.99% fat, as well as minerals. These results indicate that the food waste has a high potential for use as a substrate for the production of metabolites of greater added value. Also, the average pH of 5.53 and the low acidity (0.352%) will allow the growth of a large number of species of microorganisms.

Key words: Food waste, organic waste, nutrients, characterization, unconventional substrates.

Introducción

A nivel mundial se ha venido observando un incremento en la cantidad de residuos generados como producto de las actividades humanas. Los residuos sólidos urbanos constituyen un serio problema social, la descomposición de los mismos y en especial de la parte orgánica, ocasiona un ambiente hostil en la mayoría de los vertederos. El interés por la conservación del medio ambiente ha traído como resultado la necesidad de buscar soluciones para su manejo y disposición apropiada con la finalidad de reducir el impacto ambiental. Actualmente, la utilización de residuos orgánicos como materia prima de bajo costo, en procesos biotecnológicos para la obtención de productos químicos finos, se perfila como una opción atractiva para reducir la contaminación, la dependencia del petróleo y al mismo tiempo producir compuestos de interés comercial [1].

En el país se genera un gran volumen de residuos sólidos municipales, aproximadamente 30.000 Ton/día [2], constituidos principalmente por desechos orgánicos, estos son dispuestos en rellenos sanitarios donde se convierten en rico cultivo para bacterias y hongos generadores de enfermedades. En Venezuela no se han realizado estudios recientes sobre la composición de los residuos sólidos, sin embargo, un estudio realizado por la Organización Panamericana de la Salud [3] arrojó que el 44% de la generación de residuos sólidos del país corresponde a residuos de alimentos.

Los residuos de alimentos representan un potencial recurso de bajo o casi ningún valor económico, pero con un alto contenido nutricional, que pudiera aprovecharse para la fabricación de productos de valor agregado. Son una rica fuente de nutrientes de diferente naturaleza, que pueden ser útiles cuando se les transforma mediante reacciones apropiadas. Investigadores han utilizado residuos de alimentos en la producción de [4], biogás [5], metano [6], energía [7], bio-hidrógeno [8], etanol [9], ácido láctico [10] y poliácido láctico [11], entre otros.

El Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia diariamente presta sus servicios, en promedio,a 4000 estudiantes, trayendo consigo la generación de una alta cantidad de residuos de alimentos, posibles sustratos en la producción biotecnológica de metabolitos de interés. La cuantificación y caracterización fisicoquímica de estos residuos sentará las bases para establecer las posibles alternativas que permitan su utilización como materia prima para la producción de compuestos de utilidad y mayor valor agregado, aprovechando así de forma racional, las fuentes de materias primas naturales y renovables y logrando la reducción del impacto ambiental

Parte Experimental

Recolección, clasificación y almacenamiento de los residuos de alimentos

Los residuos de alimentos provenientes del Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia, núcleo Maracaibo, se recolectaron diariamente 200 bandejas, tomadas al azar, durante siete semanas. Se separaron en recipientes con bolsas plásticas y se clasificaron en tres grupos: A) carbohidratos,

B) proteínas y C) frutas y verduras, registrando su peso y calculando la cantidad de residuos generados por bandeja. Se registró el número total de bandejas servidas para estimar por extrapolación la cantidad total de residuos generados por día, semana y mes.

Cada día, los residuos de alimentos se cortaron utilizando un procesador de alimentos (Oster, modelo 2616), semezclaron hasta obtener consistencia homogénea y se esterilizaron en auto-clave (Felisa FE399) a 15 psi y 120°C durante 15 minutos para evitar la descomposición. Se dejaron enfriar, se colocaron en bolsas plásticas de cierre hermético y se almacenaron a -15°C.Al finalizar cada semana las muestras obtenidas diariamente se descongelaron de forma gradual y bajo ambiente estéril en la campana de flujo laminar. Se mezclaron hasta obtener una mezcla uniforme, la cual se dividió en 3 lotes iguales y se almacenaron a -15°C hasta el momento de su uso [12].

Caracterización de los residuos

Para la caracterización de los residuos de alimentos se tomaron muestras de los tres lotes almacenados cada semana. Esto representa 3 muestras por semana, para un total de 21 muestras por el período de recolección de 7 semanas. Cada muestra se analizó por triplicado. El contenido de humedad, cenizas, sólidos solubles, sólidos volátiles, nitrógeno, grasa y fibra cruda, el pH, la acidez titulable y la densidad relativa de las muestras se determinaron por los métodos establecidos por la AOAC [13]. El contenido de almidón se determinó por el método colorimétrico de Carter y Neubert [14] previa construcción de la curva patrón y midiendo el color desarrollado en un espectrofotómetro UV visible (Genesys 10 UV, Thermo Scientific, Electrón Corp.) a una longitud de onda de 570 nm. La concentración de azúcares reductores de la muestra se determinó por el método del ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) propuesto por Miller [15] utilizando glucosa como estándar a 550 nm. El contenido de azúcares totales se determinó mediante el método de Dubois et al., [16] utilizando sacarosa como estándar a 490 nm. El contenido de ácido láctico se determinó por el método colorimétrico del parafenilfenol modificado por Taylor [17], utilizando una solución de ácido láctico como estándar a 570 nm. La determinación del contenido de minerales en las muestras se realizó en el Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT) por espectrofotometría de absorción atómica previa digestión húmeda de la muestra con ácido nítrico, utilizando bombas Parr [18].

Análisis Estadístico

El procesamiento de los datos se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de media HSD de Tukey, utilizando el paquete estadístico *SPSS Statistics* 17.0.

Resultados y Discusión de Resultados

Cuantificación y clasificación de los residuos de alimentos

En el Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia, núcleo Maracaibo, se sirven almuerzos a aproximadamente 4000 estudiantes de pregrado por día.Se encontró que el promedio diario fue de 3960 ± 297 bandejas, para un total de 19800± 474 bandejas de almuerzos servidas por semana. En cuanto al tipo de alimentos, el menú servido por día se repite parcialmente cada dos semanas, clasificándose en dos programaciones. La programación A contempló el menú diario servido durante las semanas 1,3, 6 y 7 y la B el servido durante las semanas 2, 4 y 5. Del total de bandejas servidas, diariamente se recolectaron los residuos de 200 bandejas/día, en el horario comprendido entre 11:30 a.m. y 12:30 p.m., lapso seleccionado por ser el de mayor afluencia de estudiantes. La recolección se realizó al azar en el área de devolución de las bandejas, donde inmediatamente se separaron los residuos por tipo de alimento. En la tabla 1 se presentan las cantidades de residuos recolectados diaria y semanalmente. Se observa que, en promedio, se recolectaron 10,455 ± 0,679 Kg de residuos de alimentos por día, lo cual representa, en promedio 52,514 ± 4,328 Kg/semana, de un total de 1000 bandejas. Estos resultados indican que

aproximadamente el 10% de los alimentos servidos por bandeja son desechados, ya que cada bandeja servida tiene aproximadamente un cantidad promedio de 500 gramos de alimentos. La generación diaria, semanal y mensual fue de 207,96, 1039,80 y 4159,18 Kg, respectivamente, calculados a partir de los valores promedio diario (Kg/día) y promedio semanal (Kg/semana) obtenidos de la recolección de residuos de alimentos a partir de las 200 bandejas seleccionadas y la cantidad promedio de bandejas servidas.

Tabla 1. Cantidad de residuos recolectados diaria y semanalmente en el Comedor Central de la Universidad del Zulia durante el período de muestreo.

Semana	Cantidad de residuos de alimentos recolectados (Kg)					Promedio diario (Kg/día)	TOTAL (Kg/semana)
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes		
1	9,682	9,296	7,746	15,664	10,392	10,556 ± 3,015	52,780
2	12,866	9,482	7,388	12,012	9,436	10,237 ± 2,202	51,184
3	7,058	11,848	9,354	8,658	7,834	9,435 ± 1,786	44,752
4	12,840	12,630	8,456	14,010	10,846	11,679 ± 2,313	58,782
5	8,108	11,730	10,824	8,656	15,346	10,337 ± 3,203	54,664
6	10,438	10,856	10,870	13,134	9,200	10,751 ± 1,663	54,498
7	11,270	9,918	9,726	11,104	8,923	10,188 ± 0,986	50,941
Promedio						10,455 ± 0,679	52,514 ± 4,328

Nota: Promedio ± desviación estándar

En la tabla 2 se muestra la clasificación y cuantificación de los residuos de alimentos recolectados en el comedor universitario, realizada mediante inspección visual, en función al grupo alimenticio predominante, carbohidratos, proteínas, y frutas-verduras. Se encontró que los carbohidratos constituyen el 63% de la totalidad de los residuos recolectados, seguidos de las frutas y verduras con 23% y de las proteínas con 14%. De los carbohidratos, el arroz, el pan y la arepa son los principales constituyentes de los residuos desechados. Esta composición resultó similar a la de los residuos de alimentos provenientes de restaurantes de Malasia, arroz 60%, vegetales y frutas 20%, carne y pescado 20%, utilizados por Saadiah et al., [19] en la producción de ácidos orgánicos.

Tabla 2. Clasificación y cuantificación de los residuos de alimentos recolectados según el grupo alimenticio predominante.

SEMANAS	**Cantidad de residuos (Kg)**			
	CARBOHIDRATOS	**FRUTAS - VERDURAS**	**PROTEÍNAS**	**TOTAL**
1	40,278	6,086	6,416	52,780
2	33,160	12,224	5,800	51,184
3	26,448	11,538	6,766	44,752
4	33,903	15,990	8,889	58,782
5	30,032	15,404	9,228	54,664
6	33,574	12,878	8,046	54,498
7	30,779	13,818	6,344	50,941
Promedio	32,596	12,563	7,356	52,514

Estos resultados indican que más de 4000 Kg de residuos de alimentos son dispuestos mensualmente a la basurajunto a los demás desechos (servilletas, vasos plásticos, entre otros) por lo que resulta

interesante que sean estudiados para su aprovechamiento y reutilización. La maximización del aprovechamiento de los residuos generados y la minimización de la basura contribuye a conservar y reducir la demanda de recursos naturales, disminuir el consumo de energía y disminuir la contaminación ambiental, preservando los sitios de disposición final y reduciendo sus costos operativos.

Caracterización fisicoquímica de los residuos de alimentos

En la tabla 3 se observa que los residuos de alimentos presentaron un contenido de humedad entre 62 y 68%, similares al rango de 66-73%, reportado por Zhang y et al., [20] para la caracterización de residuos de alimentos provenientes de comedores de la ciudad de San Francisco, California, con el fin de ser utilizados como materia prima para la digestión anaeróbica. El valor promedio de humedad encontrado (65,79 ± 2,31%) es inferior al reportado para residuos de alimentos de comedores de Corea y China de 80%, utilizados como materia prima en la producción de compostaje [21] y para la producción de etanol [22], respectivamente. Este parámetro es de gran importancia ya que residuos de alimentos con alto contenido de humedad ocupan mayor volumen y requieren mayor consumo de energía para las operaciones de almacenamiento, secado y esterilización, disminuyendo el rendimiento global del proceso. El contenido de cenizas promedio fue de 4,48 ± 0.20%, encontrándose diferencias significativas entre las muestras de las semanas 1 y 4 en relación a las muestras del resto de semanas (p>0,05).

Tabla 3. Contenido de humedad, cenizas, sólidos totales, volátiles y solubles en las muestras de residuos de alimentos.

Semana	Humedad (%)	Cenizas (%)	Sólidos Totales (%)	Sólidos Solubles (%)	Sólidos Volátiles (%)
1	61,57±0,37^{a}	4,51±0,04^{a}	38,43 ± 0,37^{c}	6,77± 0,28^{bc}	36,71 ± 0,37^{b}
2	68,22±0,51^{c}	5,46±0,09^{b}	31,78 ± 0,52^{a}	7,09 ± 0,02^{d}	30,69 ± 0,49^{a}
3	66.66±1.07^{c}	5,21±0,17^{b}	33,34 ± 1,08^{a}	6,95 ± 0,33^{cd}	32,03 ± 1,06^{a}
4	63.72±0.44^{b}	4,78±0,06^{a}	36,28 ± 0,44^{b}	6,47 ± 0,02^{a}	34,95 ± 0,46^{b}
5	67.09±1.05^{c}	5,28±0,17^{b}	32,91 ± 1,05^{a}	6,78 ± 0,33^{bc}	31,47 ± 1,08^{a}
6	66.77±1.47^{c}	5,23±0,23^{b}	33,23 ± 1,47^{a}	6,52 ± 0,00^{ab}	31,97 ± 1,49^{a}
7	66.50±2.80^{c}	5,21±0,45^{b}	33,50 ± 2,80^{a}	6,60 ± 0,03^{ab}	32,18 ± 2,79^{a}

Nota: Los valores corresponden al promedio del análisis por triplicado de tres muestras por semana. Letras iguales como superíndice en un mismo análisis (columna) indica que no existen diferencias significativas. Prueba de comparación de medias de Tukey con α=0.05.

El contenido promedio de sólidos totales fue de 34,21 ± 2,31% observándose que los valores correspondientes a las semanas 1 y 4 fueron más altos que en el resto de las (p>0.05) en las muestras. La mayoría de estos sólidos no pueden ser solubilizados en agua a condiciones normales. El contenido promedio de solidos solubles fue de 6,74 ± 0,23%, con ligeras variaciones entre las muestras obtenidas durante las siete semanas de muestreo. El contenido de sólidos volátiles representa la cantidad de materia orgánica de la muestra,donde se encuentran todas las sustancias, excepto el agua y los minerales, que permanecen en las cenizas. Los residuos de alimentos presentaron un contenido de sólidos volátiles entre 30,7 y 36,7%, encontrándose diferencias significativas (p>0.05) en las muestras de las semanas 1 y 4. En promedio, se obtuvo un valor de 32,86 ± 2,15%, el cual representa el 96,01% de los sólidos totales presentes en la muestra. Este valor es superior al contenido de sólidos volátiles del 89% de sólidos totales reportado por Li et al., [23] y Nayono et al., [24] para residuos de alimentos utilizados como materia prima en la producción de biogás.

Las diferencias estadísticas ($p>0.05$) observadas entre los valores encontrados para los parámetros antes mencionados, específicamente entre las muestras de las semanas 1 y 4 y el resto de las muestras, son atribuibles al tipo de alimento servido [20], sin embargo estudios más detallados serán necesarios para establecer diferencias debidas a los menús servidos por día. El alto contenido de materia orgánica en los residuos recolectados se puede atribuir al plan dietético implementado, el cual está basado principalmente en carbohidratos con la finalidad de satisfacer las necesidades energéticas de los estudiantes. Los altos niveles de sólidos volátiles de los residuos indican su potencial como materia prima para la obtención de productos de valor agregado a bajos costos. Tanto la humedad como el contenido de sólidos totales son parámetros susceptibles a la zona de recolección de los residuos de alimentos.

Tabla 4. Valores promedio de pH, acidez titulable, densidad aparente y densidad relativa en las muestras de residuos de alimentos.

Semana	pH	Acidez titulable (g de ácido /100 g de muestra)	Densidad Aparente (g/mL)	Densidad Relativa
1	5.43 ± 0.05^{b}	$0,156 \pm 0,011^{a}$	$1,0014 \pm 0,0002^{bc}$	$0,9887 \pm 0,0006^{a}$
2	4.34 ± 0.04^{a}	$0,380 \pm 0.058^{d}$	$1,0015 \pm 0,0000^{c}$	$1,0020 \pm 0,0014^{bc}$
3	5.85 ± 0.04^{d}	$0,557 \pm 0,038^{e}$	$1,0014 \pm 0,0002^{bc}$	$1,0010 \pm 0,0067^{b}$
4	5.55 ± 0.03^{c}	$0,334 \pm 0,015^{c}$	$1,0011 \pm 0,0000^{a}$	$1,0089 \pm 0,0009^{d}$
5	6.39 ± 0.11^{e}	$0,448 \pm 0,016^{d}$	$1,0012 \pm 0,0002^{ab}$	$1,0028 \pm 0,0008^{bc}$
6	5.62 ± 0.05^{c}	$0,329 \pm 0,014^{c}$	$1,0011 \pm 0,0002^{a}$	$1,0052 \pm 0,0007^{cd}$
7	5.54 ± 0.09^{c}	$0,261 \pm 0,027^{b}$	$1,0011 \pm 0,0002^{a}$	$1,0035 \pm 0,0012^{bc}$
Promedio	**5,53 ± 0,58**	**0,352± 0,123**	**1,0013 ± 0,0002**	**1,0017 ±0,0006**

Nota: Los valores corresponden al promedio del análisis por triplicado de tres muestras por semana. Letras iguales como superíndice en un mismo análisis (columna) indica que no existen diferencias significativas. Prueba de comparación de medias de Tukey con $\alpha = 0.05$.

En la tabla 4 se presentan los valores de pH, acidez titulable, densidad aparente y densidad relativa de las muestras de residuos de alimentos.Se observa que el pH varía en un rango de 4,3 a 6,4 encontrándose diferencias significativas ($p>0.05$) en la mayoría de las muestras, excepto para las semanas 4, 6 y 7 que resultaron estadísticamente iguales ($p<0.05$). El pH promedio de 5,53 ± 0,58, fue similar al reportado para residuos de alimentos procedentes del comedor estudiantil del Instituto de Tecnología Harbin de China, utilizados para la producción de Glucoamilasas de *Aspergillus niger* UV-60 [25] sin ajuste del pH inicial debido a su cercanía al valor del pH óptimo (5,0) requerido. Conocer el valor del pH es importante al momento de darle una nueva utilidad a los residuos de alimentos y aunque este puede variarse con facilidad, la utilización de ácidos o bases necesarios para su ajuste, implicaría costos adicionales. La acidez titulable se encontró en el rango de 0,408 a 1,674 g de ácido acético por cada 100 gr de muestra. Se encontraron diferencias significativas ($p>0.05$) entre los valores encontrados en todas las muestras, excepto entre los correspondientes a las semanas 2 y 5 y entre las semanas 4 y 6 que resultaron estadísticamente diferentes ($p<0.05$). Las variaciones observadas, tanto de pH como de acidez titulable, se pueden atribuir a la utilización de vinagre (ácido acético) en la preparación de las ensaladas crudas incluidas en el menú servido.

Los valores obtenidos de densidad aparente y relativa fueron en promedio de 1,0013 ± 0,0002 g/mL y 1,0017 ± 0,00063, respectivamente. Este parámetro presenta muy poca variación entre las muestras semanales, aunque pueden observarse diferencias significativas entre algunas de las semanas.

Tabla 5. Valores promedio del contenido de nitrógeno, proteína, fibra cruda y grasas totales en las muestras de residuos de alimentos.

Semana	Nitrógeno (%)	Proteína Cruda (%)	Fibra Cruda (%)	Grasas Totales (%)
1	2.17 ± 0.12^{bc}	$13,55 \pm 0,76^{bc}$	$1,58 \pm 0,13^{c}$	$4,85 \pm 0,28^{bc}$
2	2.70 ± 0.18^{d}	$16,90 \pm 1,13^{d}$	$0,76 \pm 0,12^{a}$	$6,44 \pm 0,38^{cd}$
3	2.44 ± 0.14^{cd}	$15,24 \pm 0,89^{cd}$	$0,72 \pm 0,09^{a}$	$12,10 \pm 0,6^{8e}$
4	1.76 ± 0.33^{a}	$10,98 \pm 2,04^{a}$	$1,86 \pm 0,15^{d}$	$4,19 \pm 0,50^{a}$
5	1.99 ± 0.17^{ab}	$12,43 \pm 1,08^{ab}$	$1,91 \pm 0,26^{d}$	$6,11 \pm 0,36^{c}$
6	2.08 ± 0.16^{b}	$13,00 \pm 0,99^{b}$	$1,43 \pm 0,14^{bc}$	$5,71 \pm 0,70^{bc}$
7	2.17 ± 0.31^{bc}	$13,64 \pm 1,65^{bc}$	$1,28 \pm 0,24^{b}$	$7,18 \pm 1,05^{d}$
Promedio	**2,19 ± 0.31**	**13,68 ± 1,92**	**1,36 ± 0,48**	**6,69 ± 2,49**

Nota: Los valores corresponden al promedio del análisis por triplicado de tres muestras por semana. Letras iguales como superíndice en una columna indica que no existen diferencias significativas, prueba de comparación de medias de Tukey con α=0.05.

En la tabla 5 se presentan los contenidos de nitrógeno, proteína cruda, fibra cruda y grasas totales presentes en las muestras. El contenido de nitrógeno varía en el rango de 1,76 a 2,70% en base seca, con un valor promedio de 2,19 ± 0,31%. Este rango es similar al reportado por Adhikari et al., [26] de 1,7 a 2,7% para residuos de alimentos provenientes de restaurantes en Montreal utilizados para la producción eficiente de compostaje. El contenido de proteína se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno por 6,25, obteniéndose un contenido promedio de 13,68 ± 1,92% en base seca. Todos los organismos, incluyendo los microorganismos, necesitan nitrógeno para sintetizar enzimas, proteínas y ácidos nucleicos, por lo que el alto contenido de nitrógeno y proteínas presente en las muestras evidencian el potencial de estos residuos para su utilización como materia prima para procesos fermentativos.

El contenido de fibra cruda en los residuos de alimentos estuvo en el rango 0,72 a 1,91% con un valor promedio de 1,36 ± 0,48% en base seca, similar al rango reportado para residuos de alimentos por Saadiah et al., [19] de 1,25-1,78%, pero inferior al valor promedio de 2.28% reportado por Wang et al., [25]. Estos bajos niveles en fibra de los residuos de alimentos se deben a que estos están constituidos principalmente por carbohidratos simples, lo que indica que pueden ser utilizados como fuente de energía, sin necesidad de complejos tratamientos previos para aumentar la digestibilidad. El contenido de grasas totales de los residuos varió en el rango de 4,19 a 12,10%, con un valor promedio de 6,69 ± 2,49% en base seca. Estos valores son superiores al 2,16% reportado para residuos de alimentos recolectados en China [27]. Las grasas al igual que los carbohidratos son fuente de energía y es por ello que su determinación tiene gran importancia. Los altos contenidos de grasas hacen de los residuos de alimentos una materia prima de bajo costo conpotencial para extracción de grasas.

En la tabla 6 se presenta el contenido de minerales de las muestras de residuos de alimentos recolectadas por semana. De los macro minerales, el sodio es el que se encuentra en mayor proporción, con un valor promedio de 1,584 ± 0,362%, el cual es similar al reportado por Wang et al., [25] en residuos de alimentos de China de 1,608%. Su elevada proporción es proveniente del aporte de sal de mesa (NaCl) utilizado en la preparación de los alimentos. En menor proporción se encuentran el potasio (0,632 ± 0,125%), el fosforo (0,167 ± 0,040 %), el calcio (0.097± 0,032 %) y el magnesio (0,064 ± 0,012 %). De los micro minerales, el hierro se encontró en mayor proporción, con un valor promedio en base seca de 101,203 ± 100,521 mg/Kg, seguido del aluminio (68,119 ± 68,294 mg/Kg), zinc (54,172 ± 25,606 mg/Kg), cromo (11,696 ± 0,032 mg/Kg),manganeso (9,319 ± 1,822 mg/Kg) y cobre (3,597 ± 1,653 mg/Kg). Lasvariaciones entre los valores obtenidos son producto de los diferentes menús servidos cada semana. Los abundantes nutrientes presentes indican el gran potencial que tienen los residuos de alimentos como sustrato en la bioproducción de metabolitos de interés, ya que no sería necesaria una suplementación adicional.

Tabla 6. Contenido de macro y micro minerales presentes en los residuos de alimentos.

Semana	Macro minerales (g de mineral/ 100g muestra seca, %)					Micro minerales (mg/Kg muestra seca, ppm)					
	Ca	P	Mg	Na	K	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Cr
1	0,082	0,139	0,066	1,222	0,521	48,096	6,413	9,619	32,265	28,056	1,403
2	0,068	0,141	0,066	1,162	0,501	54,087	3,405	7,011	37,861	40,064	4,808
3	0,069	0,188	0,046	1,393	0,585	64,594	4,845	8,074	31,692	38,353	5,854
4	0,086	0,189	0,053	1,638	0,635	118,731	2,661	9,417	41,351	122,825	8,188
5	0,101	0,105	0,070	1,710	0,584	40,241	3,622	10,664	68,410	26,157	1,006
6	0,112	0,186	0,064	1,749	0,752	61,000	1,220	12,403	67,100	20,333	26,434
7	0,161	0,223	0,085	2,211	0,844	321,673	3,016	8,042	100,523	201,045	34,178
Promedio	**0,097**	**0,167**	**0,064**	**1,584**	**0,632**	**101,203**	**3,597**	**9,319**	**54,172**	**68,119**	**11,696**
STDV	0,032	0,040	0,012	0,362	0,125	100,521	1,653	1,822	25,606	68,294	0,032

Nota: El promedio y es la desviación estándar (STDV) corresponde al valor calculado a partir de las muestras obtenidasdurante 7 semanas.

En la tabla 7 se presenta el contenido de azúcares reductores, totales, almidón y ácido láctico en los residuos de alimentos. El contenido promedio de azúcares totales fue de 259,93 ± 18,76 mg/g de muestra seca, mientras que el contenido promedio de azúcares reductores fue de 73,42 ± 5,30 mg glucosa/g de muestra seca. Estos valores indican que el 28,25% de los azúcares presentes en las muestras son azucares reductores. Dado el alto contenido de azúcares fermentables, estos residuos podrían utilizarse como sustrato en procesos biotecnológicos, como por ejemplo, para la producción de ácido láctico, precursor del ácido poli-L láctico, con múltiples usos en la producción de bioplásticos. Ohkouchi e Inoue [10] obtuvieron 9,75 g de ácido L (+) láctico a partir 100 g de residuos de alimentos utilizando *Lactobacillus manihotivorans* LMG18011 con tiempo de fermentación de 100 días. Sakai et al., [11] utilizaron los residuos de alimentos provenientes de diversos establecimientos de comidas incluyendo hoteles, restaurantes y hospitales en Japón, para la producción de ácido poli-L-láctico, alcanzando una producción de 7,0 g por cada 100 g de residuos.

Tabla 7. Valores promedio del contenido de almidón y ácido láctico presentes en las muestras de residuos de alimentos provenientes del Comedor Central Estudiantil de LUZ.

Semana	Azúcares Totales (mg /g de muestra)	Azúcares Reductores (mg glucosas/g de muestra)	Contenido de almidón (g/g de muestra)	Contenido de ácido láctico (mg/g de muestra)
1	230.18 ± 2.21^{a}	65.01 ± 0.62^{a}	0.37 ± 0.01^{bc}	$8,99 \pm 0,43^{d}$
2	278.38 ± 4.48^{b}	78.63 ± 1.27^{b}	$0.42 \pm 0,03^{cd}$	$6,65 \pm 0,89^{c}$
3	265.60 ± 8.59^{b}	75.02 ± 2.43^{b}	0.32 ± 0.03^{ab}	$12,59 \pm 0,73^{f}$
4	243.89 ± 2.96^{a}	68.88 ± 0.84^{a}	0.31 ± 0.03^{a}	$4,66 \pm 0,67^{b}$
5	269.07 ± 8.56^{b}	75.99 ± 2.42^{b}	0.58 ± 0.05^{e}	$2,67 \pm 0,23^{a}$
6	266.66 ± 11.76^{b}	75.32 ± 3.32^{b}	0.36 ± 0.04^{ab}	$10,98 \pm 1,00^{e}$
7	265.73 ± 22.82^{b}	75.05 ± 6.44^{b}	0.48 ± 0.07^{d}	$12,48 \pm 1,47^{f}$
Promedio	**259.93 ± 18.76**	**73.42 ± 5.30**	**0.40 ± 0.10**	**8,42 ± 3,71**

Nota: Todos los resultados están expresados en base seca. Los valores corresponden al promedio del análisis por triplicado de tres muestras por semana. Letras iguales como superíndice en un mismo análisis (columna) indica que no existen diferencias significativas. Prueba de comparación de medias de Tukey con α=0.05.

A pesar de la asombrosa cantidad de residuos de alimentos producidos en el mundo no se han establecido prácticas de uso y aprovechamiento de los mismos. Las estrategias básicas de valorización como compostaje, reciclaje y recuperación de energía mediante la incineración son prácticas conocidas y ampliamente aceptadas en todo el mundo, sin embargo, son capaces de recuperar o convertir menos del 50% en peso de los residuos en productos útiles. Estrategias de valorización avanzada basadas en las tecnologías de química verde resultan más atractivas tanto práctica, como económicamente y el punto de vista sustentable puede diversificar la generación de múltiples productos de una sola materia prima usando tecnologías ecológicamente amigables [30].

La composición fisicoquímica obtenida para los residuos de alimentos recolectados desde las bandejas servidas en el Comedor Central Estudiantil de LUZ indica que es una materia prima con gran potencial biotecnológico, la cual puede utilizarse como medio de fermentación para la obtención de metabolitos de interés sin necesidad de otro tipo de nutrientes.Estos residuos, además de contener fuentes de carbono (carbohidratos) y nitrógeno (proteínas) contienenminerales, necesarios para el desarrollo de microorganismos, los cuales requieren una variedad de elementos, generalmente en forma de iones, por ejemplo, el fósforo es importante para la síntesis de ATP, fosfolípidos y ácidos nucleicos, mientras que el sodio, hierro, potasio, zinc y manganeso intervienen en la activación de ciertas enzimas, y el calcio se requiere para la formación de la pared celular. Además, tienen un pH promedio de 5,53 y una baja acidez titulable (0.352%) que permitiría el crecimiento de una gran cantidad de especies de microorganismos.

El uso de los residuos de alimentos como materia prima en procesos biotecnológicos ofrece una forma innovadora para recuperar parte de la energía y los nutrientes inicialmente invertidos en la producción de alimentos. Por métodos químicos y biológicos, los residuos de alimentos se hidrolizan en glucosa, nitrógeno amino libre y fosfato, que son utilizables como nutrientes por muchos microorganismos cuya versatilidad metabólica permite la producción de una amplia gama de productos [30, 31].

Conclusiones

En el Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia, Núcleo Maracaibo se sirven en promedio 4000 bandejas de almuerzos por día que generan una gran cantidad de residuos de alimentos que son desechados en la basura junto con servilletas de papel y vasos plásticos.

La generación diaria, semanal y mensual de residuos fue de 207,96, 1039,80 y 4159,18 Kg, respectivamente, distribuida entres grandes grupos, ricos en carbohidratos (63%), frutas y verduras (23%) y ricos en proteínas (14%).

Los residuos presentaron un pH promedio de 5,53, con 65,79% de humedad, 34.21% de sólidos totales (96% materia orgánica), 25,99% de azúcares totales, 7,34% de glucosa, 40,4% de almidón, 13,68% de proteínas, 6,99% de grasas, así como macro y micro-minerales que le confieren un alto potencial para su utilización como sustrato para la producción de metabolitos de interés con mayor valor agregado.

Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT) por su colaboración. Esta investigación fue financiada por Consejo de Desarrollo Científico y Tecnológico (CONDES) de la Universidad del Zulia mediante el Proyecto N° CC-0104-12.

Referencias bibliográficas

1. Gil R., Domínguez R., Pacho J. (2008). Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: procesos de separación y purificación. Tecnología Ciencia Educación, 23(2): 79-90.
2. Instituto Nacional de Estadística (2010). Boletín Informativo. Generación y Manejos De Residuos Sólidos en Venezuela en el año 2000, 2006 y 2007. No. 1. República Bolivariana de Venezuela.
3. Acurio G., Rossin A., Telxeira P. y Zepeda F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. BID-OPS, Washington D.C,. No. ENV 97-107.
4. Lin Ch. (2008). A negative-pressure aeration system for composting food wastes, Bioresource Technology, 99(16):7651-7656.
5. El-Mashada H. y Zhang R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste, Bioresource Technology, 101 (11): 4021-4028.
6. Lisboa M. y Lansing S. (2013). Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments, Waste Management, 33(12): 2664-2669.
7. Caton P., Carr M., Kim S. y Beautyman M. (2010). Energy recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration: A case studyEnergy Conversion and Management, 51(6):1157-1169
8. Tawfik, A., y El-Qelish, M. (2012). Continuous hydrogen production from co-digestion of municipal food waste and kitchen wastewater in mesophilic anaerobic baffled reactor. Bioresource Technology, 114, 270-274.
9. Hyung J., Cheol J. y Pak D. (2011). Feasibility of producing ethanol from food wasteWaste Management, 31(9):2121-2125.
10. Ohkouchi, Y. e Inoue, Y. (2006). Direct production of l (+)-lactic acid from starch and food wastes using *Lactobacillus manihotivorans* LMG18011. Bioresource Technology, 97(13): 1554-1562.
11. Sakai K., Taniguchi M., Miura S., Ohara H., Matsumoto T. y Shirai Y. (2004). Making Plastics from Garbage, Journal of Industrial Ecology, 7(3-4): 63-74.
12. Raga Y., y Sánchez J. (2013). Cuantificación y caracterización proximal y fisicoquímica de los residuos de alimentos de un comedor universitario. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. 81 p.
13. Association of Official Analytical Chemists (2007) Official methods of analysis of AOAC International. 18th edition. Gaithersburg, USA.
14. Carter, G. H. y Neubert, A. M. (1954). Plant Starch Analysis, Rapid Determination of Starch in Apples. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2(21), 1070-1072.
15. Miller, G. L. (1959). Modified DNS method for reducing sugars. *Anal. Chem*,*31*(3), 426-428.
16. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical chemistry, 28(3), 350-356.
17. Taylor, K. A. (1996). A simple colorimetric assay for muramic acid and lactic acid. Applied Biochemistry and Biotechnology, 56(1), 49-58.
18. Okamoto, K., Morita, M., Quan, H., Uehiro, T., & Fuwa, K. (1985). Preparation and certification of human hair powder reference material. Clinical chemistry, 31(10), 1592-1597.

19. Saadiah H., Rahman N., Nadia F, Lai P., Abd S., Hassan M. (2010). Comparative Study of Organic Acids Production from Kitchen Wastes and Simulated Kitchen Waste, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(4):639-645.

20. Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C. y Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. Bioresource technology, 98(4), 929-935.

21. Kim, J. D., Park, J. S., In, B. H., Kim, D. y Namkoong, W. (2008). Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for food waste treatment. Journal of hazardous materials, 154(1), 272-277.

22. Yan, S., Li, J., Chen, X., Wu, J., Wang, P., Ye, J., y Yao, J. (2011). Enzymatical hydrolysis of food waste and ethanol production from the hydrolysate. Renewable Energy, 36(4), 1259-1265.

23. Li, M., Zhao, Y., Guo, Q., Qian, X., y Niu, D. (2008). Bio-hydrogen production from food waste and sewage sludge in the presence of aged refuse excavated from refuse landfill. Renewable Energy, 33(12), 2573-2579.

24. Nayono S., Gallert C. y Winter J. (2010). Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production, Bioresource Technology, 101:6987-6993.

25. Wang, Q., Wang, X., Wang, X. y Ma, H. (2008). Glucoamylase production from food waste by *Aspergillus niger* under submerged fermentation. Process Biochemistry, 43(3), 280-286.

26. Adhikari, B. K., Barrington, S., Martínez, J., y King, S. (2008). Characterization of food waste and bulking agents for composting. Waste Management, 28(5), 795-804.

27. Zhao, W., Sun, X., Wang, Q., Ma, H., & Teng, Y. (2009). Lactic acid recovery from fermentation broth of kitchen garbage by esterification and hydrolysis method. Biomass and bioenergy, 33(1), 21-25.

28. Pleissner D. y Sze C. (2013). Valorisation of food waste in biotechnological processes, Sustainable Chemical Processes, 1(21): 1-6.

29. Vishnu, C., Seenayya, G., y Reddy, G. (2000). Direct conversion of starch to L (+) lactic acid by amylase producing *Lactobacillus amylophilus* GV6. Bioprocess Engineering, 23(2), 155-158.

30. Rodríguez B. y Zabala A. (2007). Producción de amilasas de Aspergillus Níger 46836 con harina de yuca como sustrato. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, 67 p.

31. Luque, R., y Clark, J. H. (2013). Valorisation of food residues: waste to wealth using green chemical technologies. Sustainable Chemical Processes, 1(10).

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Modelado de problemas de regresión lineal con el método Cuasi-Newton

Eddy Jackeline Rodríguez

Centro de Investigación de Matemática Aplicada (CIMA). Facultad de Ingeniería.
Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela.

email: eddyjackeline@yahoo.es

Recibido: 26-05-2015 Aceptado: 09-06-2015

Resumen

El método de Newton es ampliamente utilizado en las áreas afines a las matemáticas, en especial; en situaciones que involucran problemas de optimización donde el objetivo es encontrar el mínimo de una función; sin embargo; en su expresión pura, tiene como limitante el cálculo de la inversa de la matriz de los datos, es por esto, que se ha desarrollado modificaciones al método de Newton, denominándose método Cuasi-Newton. En este trabajo se aplica el método Cuasi-Newton para modelar problemas de regresión lineal, considerando como función objetivo la minimización del error para el ajuste del modelo mediante los coeficientes de regresión. Se aplica específicamente el método propuesto por Davidon-Fletcher-Powell, por tener éste la cualidad de heredar la definición positiva, lo que facilita el cálculo de la inversa de una matriz. La metodología empleada en esta investigación es teórica-prácticadonde la revisión teórica parte de la consulta de autores especialistas tales como: Boulesteix A., Strimmer K. [1], Geladi P., Kowalski B. [2], Luenberger, D. [3], Hoskuldsson A. [4], Rodríguez, E. [5]. Los resultados de los ejemplos creados experimentalmente y de los reales demuestran que el modelo de problemas de regresión lineal aplicando el método cuasi Newton es eficiente.

Palabras clave: Método Cuasi-Newton, modelado de problemas de regresión, coeficientes de regresión.

Modeling linear regression problems with the Quasi-Newton method

Abstract

Newton's method is widely used in the related areas of mathematics, especially; in situations that involve optimization problems where the objective is to find the minimum of a function, but in its purest form, is limiting the calculation of the inverse array data, which is why, it has developed modifications to Newton's method, Quasi-Newton methods being called. In this paper, the Quasi-Newton method is applied to model linear regression problems, considering the objective function minimization of error for model fit by regression coefficients. Applies specifically proposed by Davidon -Fletcher -Powell method, by having it inherit the quality of positive definition, which facilitates the calculation of the inverse of a matrix. The methodology used in this research is theoretical and practical where the theoretical review of the consultation of specialists authors such as Boulesteix A., Strimmer K. [1], Geladi P., Kowalski B. [2] Luenberger, D. [3] A. Hoskuldsson [4] Rodríguez, E. [5]. The results of the examples set experimentally, and actual model show that the problems of linear regression using the quasi Newton method is efficient.

Key words: Quasi-Newton method, regression modeling problems, regression coefficients.

Introducción

Mejorar la calidad de un producto, reducir los riesgos en una planta, minimizar los costos de producción son, entre otros ejemplos, motivos del desarrollo de herramientas de optimización para los complejos problemas de operación, estructura y diseño en una planta. Para dar respuesta a esto, se crean diferentes modelos matemáticos que logran su objetivo con la ayuda de los ordenadores, con su creciente capacidad de cálculo y con el desarrollo de software que proporcionan las herramientas adecuadas para el uso de los modelos matemáticos.

En la actualidad existen diferentes técnicas que permiten ajustar de manera satisfactoria un problema de regresión, desde el más sencillo como es el de mínimos cuadrados ordinarios,Mardia et al [6], hasta los más complejos que pueden solventar los obstáculos de colinealidad, tamaño de los datos, etcétera, tales como son las técnicas de: los factores latentes fortalecidos, Bühlmann , Hothorn [7], los mínimos cuadrados parciales, Boulesteix, Strimmer [1], Geladi, Kowalski [2] y la regresión por componentes principales, Cuadras [8], entre otros. En este trabajo se desarrolla un modelo de problema de regresión lineal[1] aplicando el método Cuasi-Newton, que también supera los obstáculos ya mencionados. Este modelo parte de la construcción de una función de costo que se traduce en minimizar el error del ajuste, transformando éste en un problema de optimización sin restricciones, alcanzando la solución a través del desarrollo de un algoritmo iterativo.

Para la investigación se utilizó una metodología teórica-experimental partiendo de la consulta en fuentes bibliográficas y sitios web, presentando primeramente una visión general de la regresión lineal múltiple basado en los mínimos cuadrados ordinarios, seguido del desarrollo del método Cuasi-Newton, la formulación del método Cuasi-Newton como modelo de regresión lineal y la obtención de los coeficientes de regresión. Por último se evalúa el algoritmo de este modelo con ejemplos experimentales y real comprobándose, a través de los resultados, quemodela de manera eficiente.

Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple consiste en determinar una combinación lineal entre las variables que participan en el problema a modelar. Esta combinación se realiza entre un conjunto de variables de entrada (predictores) y la variable de salida (respuesta). La relación entre estas variables se formula como un modelo lineal:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_n x_{ni} \ (i = 1,2, \dots, m) \tag{1}$$

donde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ son los coeficientes de la combinación lineal, llamados coeficientes de regresión. El modelo de regresión lineal de un problema se encuentra minimizando la discrepancia, es decir, minimizando la varianza residual entre el valor observado (real) y el valor estimado por el modelo:

$$\min \sum u_i^2 = \min \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{2}$$

u_i es un error aleatorio con distribución normal que mide la discrepancia, debido a la aproximación, en la i-esima observación.

Usando notación matricial: $U = Y - XB$

$U^2 = U^T U = (Y - XB)^T (Y - XB)$

[1] A los fines del presente artículo se ha preferido utilizar la denominación "modelo de problema de regresión lineal", pues la misma expresa la construcción de un modelo a un problema de regresión lineal; aunque una parte de la doctrina usa la denominación "modelo de regresión lineal".

X : Matriz de datos de las variables de entrada, de tamaño mxn.

Y : Vector de variable de salida de tamaño m.

U : Vector error de tamaño m.

B : Vector de coeficientes de regresión de tamaño n.

Quedando la varianza residual como una función que depende de la matriz B así:

$$f(B) = U^T U = (Y - XB)^T (Y - XB) \tag{3}$$

la cual encuentra su mínimo cuando se cumple: $\frac{\partial f}{\partial B} = 0$

Obteniendo los coeficientes de regresión:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{4}$$

siempre que $X^T X$ sea una matriz no singular.

El método descrito en esta sección para obtener los coeficientes de regresión es el de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO) que tiene como limitante el comportamiento de la matriz $X^T X$. Es importante observar que si las variables de entrada están fuertemente correlacionadas entre sí o puede escribirse alguna como combinación lineal de las restantes, la matriz $X^T X$ tendrá como determinante un valor cercano a cero o será cero, lo que producirá una matriz singular o inestable en la solución del estimador, ocasionando un aumento en su varianza. Para superar estos obstáculos en la actualidad existen métodos tales como el de análisis de componentes principales, mínimos cuadrados parciales y factores latentes fortalecidos entre otros que se basan en la construcción de espacios que contengan sólo las variables necesarias para predecir el modelo de estudio Bühlmann, Hothorn [7], Cuadras, [8], Hoskuldsson [4], Krämer et al [9] .

Más adelante, se propone y desarrolla la construcción de un modelo de regresión que obtiene los coeficientes de regresión usando métodos de optimización donde el comportamiento de la matriz $X^T X$ no representa un obstáculo.

Métodos Cuasi-Newton

Los algoritmos para la optimización no lineal sin restricciones con múltiples variables se pueden clasificar como: búsqueda sin el uso de derivadas, búsqueda con la información de la primera derivada (gradiente) y búsqueda con la información de la segunda derivada. Entre los algoritmos que usan el gradiente se encuentran los métodos Cuasi-Newton los cuales son una modificación del método de Newton, en los que se construye una aproximación de la curvatura de la función no lineal utilizando sólo información de la primera derivada, evitando la construcción de la matriz de segundas derivadas (Hessiana).

El método de Newton se basa en que una función f se aproxima a una función cuadrática para ser minimizada; para ello, cerca del punto de estudio, la función se aproxima por la serie de Taylor truncada:

$$f(x) \simeq f(x_k) + \nabla f(x_k)(x - x_k) + \frac{1}{2}(x - x_k)^T H(x_k)(x - x_k) \tag{5}$$

El lado derecho se minimiza en:

$$x_{k+1} = x_k - (H(x_k))^{-1} \nabla \mathrm{f}(x_k)^T \tag{6}$$

Considerando las condiciones de suficiencia de segundo orden para un punto mínimo, se supone que para un punto mínimo relativo x^*, la matriz Hessiana $H(x^*)$ es definida positiva. De manera que si f tiene segundas derivadas parciales continuas, $H(x^*)$ es definida positiva cerca de x^*, por lo que el método está bien definido cerca de la solución Luenberger [3].

Es posible que el punto generado con el método de Newton no converja, debido a que la matriz Hessiana puede ser singular. Sin embargo, si el punto de inicio es cercano al punto óptimo, tal que, el gradiente en este punto es igual a cero y la matriz Hessiana evaluada en este punto es de rango completo, entonces el método de Newton está bien definido y converge al punto óptimo. Esto se explica en Luenberger [3] con el teorema: sea $f \in C^3$ en E^n, y supóngase que en el punto mínimo local x^*, el Hessiano $H(x^*)$ es definido positivo. Entonces, si se comienza suficientemente cerca de x^*, los puntos generados por el método de Newton convergen a x^*. El orden de convergencia es al menos dos.

El método de Newton puede ser modificado de manera de garantizar la convergencia desde cualquier punto de inicio. Dado un x_k, considere la dirección $d = -R\nabla f(x_k)^T$, donde $R = (\in I + H)^{-1}$ es una matriz simétrica definida positiva con $H = H(x_k)$ y $\in \geq 0$. La sucesión de puntos se calcula a través de $x_{k+1} = x_k + \lambda d$, donde λ es la solución optimal del problema de minimización $f(x_k + \lambda d)$ sujeto a $\lambda \geq 0$. El escalar $\in \geq 0$ puede calcularse de la siguiente manera: Fije un $\delta > 0$, de manera que $\in \geq 0$ sea el escalar más pequeño que haga todos los valores propios de la matriz $(\in I + H)$ mayores o iguales a δ. Esta matriz es definida positiva, todos sus valores propios son positivos y tiene inversa. En particular la matriz R es también definida positiva. Ya que los valores propios de una matriz dependen continuamente de sus elementos, $\in$ es una función continua de x y de aquí el mapeo punto a punto D: $E^n \rightarrow E^n x E^n$ definido por $D(x) = (x,d)$ es continuo. Esto es el algoritmo mapea $A = MD$, donde M es la búsqueda lineal usual $\{\lambda: \lambda \geq 0\}$.

Sea $\Omega = \{x^*: \nabla f(x^*) = 0\}$ y $x \notin \Omega$, mientras R sea definida positiva, $d \neq 0$ entonces, M es cerrado en (x,d), ya que D es una función continua entonces A es cerrado sobre el complemento de Ω. Además, como $\nabla f(x)^T d = \nabla f(x)^T R \nabla f(x)^T < 0$, R es definida positiva y $\nabla f(x) \neq 0$, entonces, d es una dirección de descenso de f en x. Defínase a $y \in A(x)$ de manera que $f(y) < f(x)$, entonces f es una función de descenso y asumiendo que la secuencia generada por el algoritmo está contenida en un conjunto compacto, se sigue que el algoritmo converge. Esto demuestra que si el menor valor propio de la matriz H es mayor o igual que un δ, entonces el conjunto de puntos $\{x_k\}$ generado por el algoritmo alcanza el x^*. Es de observar que si $\in_k = 0$, entonces $d_k = -H(x_k)^{-1}\nabla f(x_k)^T$, lo que nos lleva al algoritmo del método de Newton sin modificación.

La utilidad de este algoritmo presenta como obstáculo el cálculo de los valores propios de la matriz Hessiana. En la práctica se puede recurrir al procedimiento de Levenberg- Marquardt, o puede usarse la factorización de Cholesky. También existe los métodos Cuasi-Newton, que forman una aproximación a la inversa del Hessiano, cuya forma puede variar desde las más sencillas, donde la matriz permanece fija durante el proceso iterativo, hasta los más avanzados donde se construyen aproximaciones mejoradas basadas en la información del proceso.

Construcción de la Matriz Inversa

En los métodos Cuasi-Newton la inversa de la matriz Hessiana (H) o una aproximación de ella se logran por la información almacenada durante el desarrollo del proceso de descenso. Idealmente la aproximación converge a la inversa de H en el punto solución. Sea $f \in E^n$ con segundas derivadas parciales continuas, si para dos puntos x_{k+1}, x_k, se define: $p_k = x_{k+1} - x_k$ como una dirección, entonces: $\nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \cong H(x_k)p_k$

Si H es constante, queda: $q_k \equiv \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) = Hp_k$

De manera que la evaluación del gradiente en dos puntos suministra información sobre H. Si se determinan "n" direcciones linealmente independientes p_k con $k = 0,1, \ldots, n-1$, de manera que se puede definir a P y Q como matrices nxn con columnas p_k y q_k respectivamente entonces: $H = QP^{-1}$.

Si se define a F como la aproximación a la inversa del Hessiano, de manera que: $F_{k+1}q_i = p_i$ $0 \leq i \leq k$, luego de "n" pasos linealmente independientes se tendrá $F_n = H^{-1}$.

Sin embargo con k<n hay infinidad de soluciones y se tendría que tener presente algunas consideraciones adicionales, tales como:

Corrección de rango uno

Como la matriz Hessiana y su inversa son simétricas, es normal exigir que la aproximación a su inversa sea simétrica y se puede definir una recursión que conserva la simetría:

$$F_{k+1} = F_k + a_k z_k z_k^T$$

donde a_k es una constante y z_k es un vector.

El segundo término de la ecuación define una matriz de rango uno con la que se actualiza la aproximación a la inversa: $p_k = F_{k+1} q_k = F_k q_k + a_k z_k z_k q_k^T$

Pre-multiplicando esta ecuación por q_k^T queda: $q_k^T p_k - q_k^T F_k q_k = a_k (z_k^T q_k)^2$ lo que lleva a:

$$F_{k+1} = F_k + \frac{(p_k - F_k q_k)(p_k - F_k q_k)^T}{q_k^T (p_k - F_k q_k)} \tag{7}$$

Luego, aplicando el método de descenso se calcula la dirección: $d_k = -F_k \nabla f_k$

Se minimiza $f(x_k + a d_k)$ respecto $a \geq 0$ y se determinan $x_{k+1} = x_k + a_k d_k, p_k = a_k d_k, \nabla f(x_{k+1})$.

Esta forma de obtener la inversa tiene por limitación que se garantice la definición positiva de (7), lo cual sucede si $q_k^T (p_k - F_k q_k) > 0$, y por implicaciones numéricas es recomendable que no sea muy cercano a cero.

Corrección de rango dos o propuesta de Davidon-Fletcher-Powell (DFP)

La inversa de la matriz Hessiana es actualizada en cada paso con la suma dedos matrices de rango uno. Se inicia con cualquier matriz $F(x_0)$ definida positiva simétrica, con cualquier punto x_0, y se calculan:

La dirección $d_k = -F_k \nabla f(x_k)$

Se minimiza $f(x_k + a d_k)$ respecto a $a \geq 0$.

Se determinan $x_{k+1} = x_k + a_k d_k$, $p_k = a_k d_k$, $\nabla f(x_{k+1})$

Se calcula $F_{k+1} = F_k + \frac{p_k p_k^T}{p_k^T q_k} - \frac{F_k q_k q_k^T F_k}{q_k^T F_k q_k}$ (8)

Una propiedad interesante de esta propuesta es que hereda la definición positiva, es decir: si F_0 es definida positiva y si el paso usado por el método de DFP tiene la propiedad $p_k^T q_k > 0$, entonces F_k es definida positiva $\forall\ k$. (Luenberger, 1989). Esta propiedad es muy importante en los métodos Cuasi-Newton ya que obliga al algoritmo a tener siempre una dirección de descenso.

Familia de Broyden

Considera actualizaciones en la misma matriz Hessiana, en lugar de su inversa. Se denota la k-ésima aproximación de H por B_k y se busca satisfacer a: $q_i = B_{k+1} p_i \quad 0 \leq i \leq k$

con $B_{k+1} = B_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T p_k} - \frac{B_k p_k p_k^T B_k}{p_k^T B_k p_k}$ (9)

Esta ecuación (9) es conocida como la actualización de Broyde-Fletcher-Goldfarb-Shanno.

Métodos Cuasi-Newton como modelo de regresión lineal

Como se vio previamente un modelo a un problema de regresión lineal se construye a partir de la premisa: $min \sum u_i^2 = min \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$, lo cual puede verse como un problema de optimización sin restricciones.

El objetivo es encontrar el punto óptimo B que minimice la función: $f(B) = U^T U = (Y - XB)^T (Y - XB)$

Para ello en este trabajo se aplica y se desarrolla un modelo usando los algoritmos de los métodos Cuasi-Newton, específicamente el que corresponde a la propuesta de DFP, por sus propiedades

$$min\, f(B) = min[(Y - XB)^T (Y - XB)] = min\, (Y^T Y - 2B^T X^T Y + B^T X^T XB)$$

Como $Y^T Y$ no depende de la variable B, puede escribirse $k = Y^T Y$. Además, no se altera la minimización de la función $f(B)$ si se divide entre 2.

$$min\left(\frac{k}{2} - B^T X^T Y + \frac{1}{2} B^T X^T XB\right) \tag{10}$$

Esta nueva función para $f(B)$ puede verse como la aproximación de Taylor que hace el método de Newton en la ecuación (5), donde el gradiente de la función es $\nabla f(B) = X^T XB - X^T Y$ y la matriz Hessiana es $H(B) = X^T X$.

El mínimo se obtiene en: $B_{k+1} = B_k - (H(B_k))^{-1} \nabla f(B_k)^T$

Sustituyendo el gradiente y la matriz Hessiana:

$$B_{k+1} = B_k - (X^T X)^{-1} (X^T XB_k - X^T Y)^T \tag{11}$$

En este caso, para asegurar la convergencia en el punto generado en (11), debido a que la matriz $(X^T X)^{-1}$ puede ser singular, se encuentra el mínimo mediante una modificación al método de Newton, aplicando la propuesta deDavidon-Fletcher-Powell para encontrar la matriz inversa:

$$F_{k+1} = F_k + \frac{p_k p_k^T}{p_k^T q_k} - \frac{F_k q_k q_k^T F_k}{q_k^T F_k q_k}$$

con, $p_k = -a_k F_k (X^T XB_k - X^T Y)$, $q_k = (X^T XB_{k+1} - X^T Y) - (X^T XB_k - X^T Y)$

F es la aproximación a la inversa de la matriz Hessiana $(X^T X)^{-1}$.

Algoritmo de un modelo de regresión lineal con método Cuasi-Newton

Dado: B_0, F_0 (definida positiva simétrica).

Para $k = 0$ hasta n. Calcúlese:

$\nabla f(B) = X^T XB - X^T Y$

$d(B_k) = F_k \nabla f(XB_k)$ (*dirección de descenso*)

Se minimiza $f(B_k + ad(B_k))$ respecto $a \geq 0$ y se determinan:

$B_{k+1} = B_k + a_k d(B_k)$

$p_k = a_k d(B_k), \nabla f(B_{k+1})$

$q_k \equiv \nabla f(B_{k+1}) - \nabla f(B_k)$

$$F_{k+1} = F_k + \frac{p_k p_k^T}{p_k^T q_k} - \frac{F_k q_k q_k^T F_k}{q_k^T F_k q_k}$$

Coeficientes de Regresión con mínimos cuadrados ordinarios y Método Cuasi-Newton:

En la tabla 1, se presenta un cuadro comparativo de cómo se obtiene los coeficientes de regresión aplicando el método de mínimos cuadrados ordinarios y el método Cuasi-Newton:

Tabla 1. Obtención de los Coeficientes de Regresión (*B*).

Mínimos Cuadrados Ordinarios	Cuasi-Newton
$B = (X^T X)^{-1} X^T Y$	Proceso iterativo: $B_{k+1} = B_k - (X^T X)^{-1} (X^T X B_k - Y^T X)^T$ $B_{k+1} = B_k - (X^T X)^{-1} (B_k^T X^T X - X^T Y)$ $B_{k+1} = (X^T X)^{-1} X^T Y$

Se puede observar que con ambos métodos se llega a la misma fórmula para obtener los coeficientes de regresión; sin embargo, como se explicó anteriormente, el cálculo de la inversa de la matriz ($X^T X$) falla cuando las variables de entrada presentan colinealidad, es en estos casos que el método Cuasi-Newton representa una buena alternativa ya que la inversa de la matrizes actualizada en cada paso con la suma dedos matrices de rango uno (método de DFP) durante el proceso de iteraciones, garantizando su existencia.

Resultados y conclusiones

En este trabajo se proponen cinco ejemplos de modelado de problemas de regresión lineal que evidencian la eficiencia del algoritmo del método propuesto en esta investigación. Cuatro de los ejemplos son creados experimentalmente y uno proviene de datos reales.

Ejemplo 1: está formado de ocho variables de entrada con distribución normal (X) y una variable de salida (Y) con 100 observaciones de cada una, todas las variables de entrada son independientes. La variable respuesta se construye a partir de: $Y = XB$, con B = (1,3,5,7,8,9,4 12).

Ejemplo 2: está formado de ocho variables de entrada con distribución normal (X), una variable de salida (Y) y un error aleatorio normal (u) con 100 observaciones de cada una, todas las variables de entrada son independientes.La variable respuesta se construye a partir de: $Y = XB + u$, con B = (1,3,5,7,8,9,4 12),

Ejemplo 3: está formado de ocho variables de entrada con distribución normal (X) y una variable de salida (Y) con 100 observaciones de cada una, hay cuatro variables de entrada independientes X_i, con i: 1,2,3,4 y el resto son generadas: $X_5 = 2X_1$, $X_6 = X_2 + X_3$, $X_7 = 3X_1 + 2X_2 + X_3$, $X_8 = 4X_4$.La variable respuesta se construye a partir de: $Y = XB$, con B = (1,3,5,7,8,9,4 12).

Ejemplo 4: está formado de nueve variables de entrada (X), una variable de salida (Y) y un error aleatorio normal (u) con 100 observaciones de cada una, como se plantea en Rodríguez [5], $Y = 5X_1 + X_2 + 7X_3 + 2X_4 + 0.5X_5 + 3X_6 + X_7 + 0.7X_8 + 3X_9 + u$

donde X_i con i = 1, ... , 5 son linealmente independientes y de distribución normal y las i = 6, ... , 9 son formadas por la combinación lineal de las otras variables.

Ejemplo 5: es un conjunto de datos que comprende intensidades espectrales de 60 muestras de gasolina en 401 longitudes de onda, medidos en intervalos de 2 nm de 900 nm a 1700 nm, y sus índices de octano (octanaje). Estos datos se describen en Kalivas, John H., "dos conjuntos de datos de espectros de infrarrojo cercano", Quimiometría y Laboratorio de Sistemas Inteligentes, V.37 (1997), pp.255-259.

Los datos de cada ejemplo son divididos en dos grupos, uno es usado para entrenar el algoritmo y el otro grupo para la validación del mismo.

La eficiencia del método, aquí propuesto, se comprueba a través de los criterios: Suma de los cuadrados de los errores (SSE), que refleja la variación de los datos observados alrededor de la línea de regresión. Coeficiente de determinación múltiple (R^2), que indica que proporción de la variación total de la respuesta Y es explicada por el modelo ajustado. Promedio de la suma de los cuadrados de los errores (PSSE), que muestra en promedio la diferencia de los datos observados respecto a los datos obtenidos por el modelo ajustado.

Los resultados de los ejemplos se presentan en la tabla 2, y en esta se puede observar que en base a los criterios de evaluación SSE, R^2 y PSSE el algoritmo del modelo de regresión lineal con método Cuasi-Newton, arroja excelentes resultados en los casos de los ejemplos 1 y 3, donde no hay presencia de error aleatorio normal, el ajuste con los datos de validación es de 2.8783e-012 y 3.8275e-017 para la suma de los cuadrados de los errores y de 5.7566e-014 y 7.6551e-019 para el promedio de la suma de los cuadrados de los errores respectivamente lo que indica que el error cometido es insignificante. Para los ejemplos 2 y 4, donde hay presencia de error aleatorio normal, es de notar que el error sigue siendo bajo. En el caso del ejemplo 4, se consideró el propuesto en Rodríguez [5], con el objeto de comparar la eficiencia del algoritmo planteado en este trabajo con el algoritmo PLS que es un método reconocido para el modelaje de problemas de regresión lineal cuando el conjunto de variables de entrada están correlacionadas. Los resultados se expresan en la tabla 3 y, es de notar que el algoritmodel modelo de regresión lineal con método Cuasi-Newton ajusta los valores de la validación de manera satisfactoria.

Tabla 2. Resultados obtenidos con los datos de validación.

EJEMPLOS	SSE	R^2	PSSE
Ejemplo 1: las variables de entrada son independientes. No hay ruido.	2.8783e-012	1.0000	5.7566e-014
Ejemplo 2: las variables de entrada son independientes. Hay ruido normal.	4.6132e-005	1.0000	9.2263e-007
Ejemplo 3: las variables de entrada son dependientes. No hay ruido.	3.8275e-017	1	7.6551e-019
Ejemplo 4: las variables de entrada son dependientes. Hay ruido normal.	9.2930e-016	1	1.8586e-017
Ejemplo 5: datos reales.	3.4274	0.9459	0.1142

Tabla 3. comparación de los resultados del ejemplo 4.

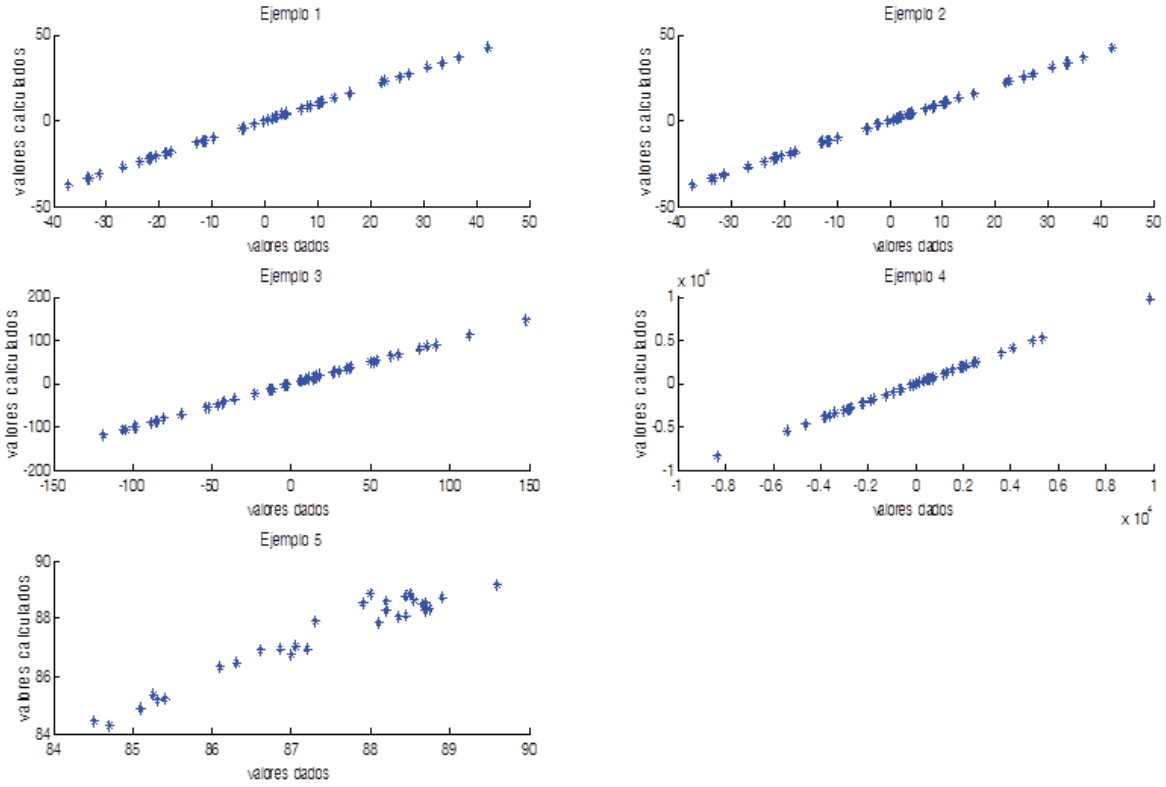
Método	SSE	R^2	PSSE
PLS[1]	2,8904e-022	1	5,7808e-024
Cuasi-Newton	9.2930e-016	1	1.8586e-017

Para el ejemplo 5, donde se trabaja con datos reales, el PSSE es de tan solo 0.1142 y la SSE es de 3.4274 con una relación lineal entre los valores dados y calculados de 0.9459, muy cercano a 1, es decir, que el 94,59% de la variación de los datos observados se explica mediante el modelo. Lo que demuestra que el ajuste del modelo es satisfactorio.

En la figura 1, se observan cinco gráficas, que corresponden a los ejemplos del 1 al 5, donde se representan la relación lineal entre la variable de salida dada y la variable de salida estimada por el modelo, aplicado al conjunto de validación; en todas ellas se destaca que existe una relación lineal de pendiente positiva de valor uno o muy cercana a uno (R^2).

Se puede concluir en base al desarrollo teórico y verificación experimental queel modelado de problemas de regresión lineal usando el método de optimización Cuasi-Newton es eficiente. Con este método se logra solventar los problemas de colinealidad entre las variables de entrada, como se verifica en los ejemplos 3 y 4, de igual manera se comprueba lo robusto del algoritmo planteado en esta investigación ante la presencia de ruido aleatorio normal, como se ve en los ejemplos 2, 4 y 5.

Figura 1. Representación de los valores dados versus los valores calculados.



[2] Algoritmo de mínimos cuadrados parciales (PLS) a partir del método de mayor pendiente. Rodríguez [5].

Referencias bibliográficas

1. Boulesteix A., Strimmer K. (2006). *Partial Least Squares: a versatile tool for the analysis of high-dimensional genomic data.* Briefings in Bioinformatics Vol. 8 No. 1 p 32-44.
2. Geladi P., Kowalski B. (1986). *Partial Least- Squares Regresión: A Tutorial*. Elsevier Science Publishers B V. p 1-17
3. Luenberger D. E. (1989). *Programación Lineal y no Lineal.* Addison – Wesley Iberoamericana, S. A. p. 499.
4. Hoskuldsson A. (1998). *PLS Regression Methods. Journal of Chemometrics*. Vol. 2. p. 211-228
5. Rodríguez, E. (2012). *Mínimos Cuadrados Parciales con el Descenso de Mayor Pendiente.* Maracaibo, Venezuela. Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta. N° 3.
6. Mardia K., Kent J., & Bibby J. *Multivariate analysis*. Academic Press. (1979).
7. Bühlmann P., Hothorn T. (2007). *Boosting Algorithms: Regularization, Prediction and Model Fitting.* Statistical Science. Vol. 22 No 4. p. 477- 505. Recuperado de http://www.cs.princeton.edu/~schapire/boost.html.
8. Cuadras C.M. (1991). *Métodos de Análisis Multivariante.* Promociones y Publicaciones Universitarias, S. A. p. 1115
9. Krämer N., Boulesteix A., & Tutz G. (2008). *Penalized Partial Least Squares with Application to B-Spline Transformation and Functional Data.* p. 1-26. Recuperado de http://www.wias-berlin.de/people/kraemer/papers/chemo_ppls.pdf_.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Efecto de las condiciones de hidrofobización de una arcilla natural sobre su distribución y dispersión en mezclas de poliestireno/polibutadieno/estireno

Ida González*, Haydée Oliva, Ysabel Cedeño, Helen Iniciarte, Diana Soto y Eliezer Velásquez

Laboratorio de Polímeros y Reacciones. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.
Sector Grano de Oro. Edificio de Petróleo y Química.
Maracaibo, Estado Zulia. Venezuela.

* Correo del autor de correspondencia: igonzalez@fing.luz.edu.ve

Recibido: 04-07-2014 Aceptado:07-07-2015

Resumen

Se estudió el efecto de las condiciones en la modificación orgánica de una arcilla natural del tipo montmorillonita (MMT-Na^+) sobre su distribución y dispersión en mezclas incompatibles de poliestireno/polibutadieno/estireno (PS/PB/S). Se emplearon como modificadores orgánicos el cloruro de vinil-bencil-trimetilamonio (VBTMA) y el bromuro de hexadecil-trimetilamonio (HDTMA). Las arcillas organofílicas fueron caracterizadas por difracción de rayos X (XRD) y las cantidades de arcilla en las fases separadas de las mezclas fueron determinadas gravimétricamente, luego de la calcinación de las muestras. Se comparó el reparto entre las fases de una arcilla hidrofobizada con HDTMA con el de una arcilla comercial (Cloisite 10A). El grado de intercalación obtenido para la montmorillonita sódica fue mayor con la sal de amonio alifática (HDTMA) que con la sal de amonio aromática (VBTMA) debido a la rigidez y a los efectos estéricos del anillo aromático. En las mezclas con mayor cantidad de PS (15% de conversión simulada de S), las organoarcillas MMT-HDTMA y Cloisite 10A se concentraron preferentemente en la fase rica en PB y se comportaron como compatibilizantes en la polimezcla. Se propusieron dos mecanismos diferentes para explicar su acción, en función de la naturaleza de las fases continua y dispersa.

Palabras clave: Modificación orgánica, arcilla montmorillonita, dispersión, poliestireno, polibutadieno.

Effect of the hydrophobization conditions of a natural clay on its distribution and dispersion in polystyrene/polybutadiene/styrene blends

Abstract

The effect of conditions in the organic modification of a natural montmorillonite clay (MMT-Na^+) on its distribution and dispersion in incompatible blends of polystyrene/polybutadiene/styrene (PS/PB/S) was studied. Vinylbenzil-trimethylammonium chloride (VBTMA) and hexadecyl-trimethylammonium bromide (HDTMA) were used as organic modifiers. The organophilic clays were characterized by X-ray diffraction (XRD), while the fraction of the clay in each separated -phases from the incompatible blends were determined gravimetrically after the calcination of the samples. The distribution between the phases of a hydrophobized clay with HDTMA and commercial clay (Cloisite 10A) was compared. The intercalation for the sodium montmorillonite was higher

with the aliphatic ammonium salt (HDTMA) than with the aromatic ammonium salt (VBTMA) due to the rigidity and steric effects of the aromatic ring. In blends with the highest fraction of PS (15% simulated conversion of S), the MMT-HDTMA and Cloisite 10A organoclays preferred the PB rich- phase. They behaved as compatibilizers in the investigated polyblends. Depending on the nature of the continuous and dispersed phases, two different mechanisms for explaining its action were proposed.

Key words: Organic modification, montmorillonite clay, dispersion, polystyrene, polybutadiene.

Introducción

Las arcillas son usadas en un gran número de aplicaciones debido a sus altas capacidades de intercambio catiónico, de hinchamiento y adsorción y su gran área superficial. Una aplicación importante de estos minerales es en la preparación de nanocompuestos poliméricos, materiales que poseen un gran potencial debido a las mejoras sustanciales que presentan en sus propiedades mecánicas, térmicas y de permeabilidad a los gases cuando se comparan con el polímero virgen o con compuestos que contienen rellenos de tamaño mili o micrométrico.

Estas propiedades únicas de los nanocompuestos se logran cuando se incorporan y dispersan homogéneamente pequeñas cantidades de silicato de escala nanométrica en la matriz del polímero. Sin embargo, las nanocapas de arcilla no se separan ni dispersan fácilmente en la mayoría de los polímeros debido a la incompatibilidad intrínseca entre las capas del silicato, altamente hidrófilas, y la matriz de polímero, generalmente hidrófoba, razón por la cual se requiere una modificación previa de la polaridad de la arcilla por intercambio iónico de los cationes inorgánicos de la intercapa por surfactantes catiónicos orgánicos, tales como sales de alquilamonio, alquilsulfonio o alquilfosfonio.

Se han generado varias investigaciones dirigidas a desarrollar un método eficaz para dispersar arcillas minerales en matrices de polímeros hidrófobos mediante el uso de modificadores orgánicos [1-4]; sin embargo, el proceso de modificación depende de diversos factores que afectan el grado de exfoliación de la arcilla y por consiguiente, las propiedades finales del material. Por esta razón, los resultados obtenidos para un sistema en particular algunas veces no son reproducibles.

Arora *et al*. [1] analizaron el efecto de diferentes modificadores orgánicos sobre la dispersión de las organoarcillas en la matriz de poliestireno. Los autores emplearon tres sales de amonio: bromuro de tetraetilamonio (TEAB), bromuro de tetrabutilamonio (TBAB) y bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) para preparar organoarcillas por intercambio catiónico. Obtuvieron nanocompuestos de poliestireno (PS) por mezclado en fundido usando la arcilla comercial Nanolin DK4 o Nanolin DK4 modificada con las sales mencionadas anteriormente. Los análisis por difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de transmisión, indicaron que las arcillas modificadas fueron intercaladas o exfoliadas dentro de la matriz de PS en una mayor extensión que la arcilla comercial sin modificar. Además, reportaron que la arcilla modificada con TBAB fue más efectiva en promover estructuras exfoliadas en la matriz de PS, lo cual demostró que la estabilidad estructural de la sal de amonio ejerce un rol fundamental durante el procesamiento de los nanocompuestos.

Por otra parte, Ranya *et al*. [2] diseñaron y sintetizaron una serie de surfactantes para usarlos como modificadores orgánicos de arcillas hidrófilas, con la finalidad de investigar el efecto de la arquitectura del surfactante sobre la morfología de nanocompuestos de PS polimerizados *in situ* por radicales libres. Se varió la estructura de los surfactantes para estudiar el efecto de: a) la posición del grupo amonio, b) la inclusión de un grupo polimerizable y c) la longitud de la cadena alquílica. Concluyeron, que los aspectos importantes en el diseño de la estructura del surfactante para lograr nanocompuestos con morfologías exfoliadas incluyen los siguientes: la localización del grupo amonio adyacente a la unidad de estireno en combinación con la mayor longitud de la cadena alquílica, la presencia de grupos que pueden polimerizar con el estireno, que el surfactante sea soluble en el monómero, y que la concentración del modificador orgánico corresponda al 100% de la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla.

Existe muy poca información publicada sobre la formación de nanocompuestos basados en poliestireno de alto impacto (HIPS) y el efecto de las condiciones de la hidrofobización de las arcillas sobre las propiedades finales en este tipo de materiales. Se han reportado estudios donde se investiga la preparación de nanocompuestos de HIPS usando arcillas modificadas con sales de octadecilamonio [5], polibutadieno injertado con cloruro de vinil bencil [6] y sales de amonio de un copolímero de estireno-lauril acrilato [7], resultando en nanocompuestos con morfología intercalada. En otras investigaciones, se han reportado estructuras exfoliadas en los nanocompuestos usando una montmorillonita intercalada con un iniciador radical catiónico [8] y una sal de amonio cuaternaria de polibutadieno funcionalizada con una α-amina terciaria [9]. Por otra parte, la modificación de una montmorillonita sódica con trifenil fosfito (TPP) [10] resultó en materiales con una dispersión deficiente de la arcilla, obteniéndose una morfología tactoide.

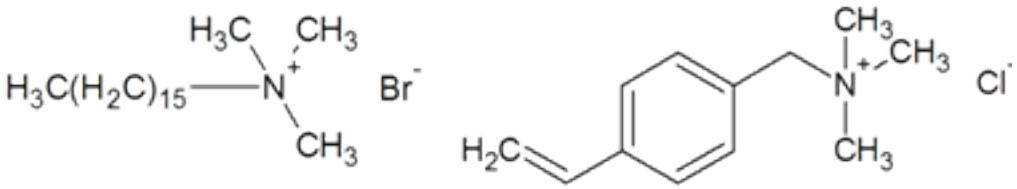
Aunque en las publicaciones anteriores se ha reportado el efecto de diferentes arcillas modificadas orgánicamente sobre las propiedades térmicas y mecánicas de nanocompuestos basados en HIPS, en la mayoría de estos trabajos no se aclaran los mecanismos responsables de la distribución de la arcilla en este sistema polimérico heterofásico y su influencia sobre la mejora en las propiedades de estos materiales. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las condiciones de la modificación orgánica de arcillas sobre su distribución y dispersión en mezclas de poliestireno/polibutadieno/estireno (PS/PB/S), con la finalidad de tratar de dilucidar el mecanismo que gobierna el reparto de estas arcillas hidrofobizadas entre las fases de polímeros incompatibles (PB/S y PS/S), en la búsqueda de una ruta de síntesis eficiente para la preparación de nanocompuestos de HIPS.

Parte experimental

Materiales

En este estudio se empleó una montmorillonita sódica (MMT-Na^+), recibida en su estado natural y usada sin previa purificación, con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 87 mequiv/100 g de arcilla. Se emplearon dos tipos de sales amonio, el bromuro de hexadecil-trimetilamonio (HDTMA) y el cloruro de vinil-bencil-trimetilamonio (VBTMA), cuyas estructuras se muestran en la Figura 1. El monómero estireno, el poliestireno, con un índice de fluidez de 19-26 g/10 min y el caucho polibutadieno (40% cis, 50% trans, 10% vinil) fueron suministrados por Estirenos del Zulia (ESTIZULIA).

Figura 1. Estructuras químicas de los surfactantes. a) HDTMA, b) VBTMA.



Procedimiento experimental

Modificación orgánica de la arcilla hidrofílica

El procedimiento para la preparación de las organoarcillas fue el siguiente: 1 g de MMT-Na^+ se dispersó en 100 mL de agua desionizada a 25ºC, usando un agitador magnético a 450 rpm por 16 h. Seguidamente, se agregó lentamente a la dispersión una solución del surfactante preparada previamente, disolviendo 0,3172 g de HDTMA ó 0,1842 g de VBTMA (equivalente a 1 CIC de la arcilla) en 50 mL

de agua desionizada. Luego de 8 h de agitación a la temperatura del experimento (25ºC, 60ºC y 80ºC), las arcillas modificadas se filtraron al vacío y se lavaron con agua desionizada hasta que no se detectó la presencia de cloruros o bromuros, usando una solución acuosa al 5% de $AgNO_3$. Posteriormente, se secaron en un horno de vacío a una temperatura de 55°C hasta peso constante, se trituraron en un mortero de porcelana y se almacenaron en un desecador. Las arcillas organofílicas se caracterizaron por XRD, usando un difractómetro Rich-Sefer, JSO Debye Flex 2002 operando a 40 Kv y 40 mA, con una radiación de CuKα (λ=1,5406 Å).

Distribución de las organoarcillas en las fases separadas de PS/S y PB/S

Se prepararon mezclas de PS/PB/S/arcilla y se evaluó la distribución de la arcilla organofílica en fases separadas de PS/S y PB/S. Adicionalmente, se utilizó una organoarcilla comercial, Cloisite 10A, para propósitos de comparación. Las mezclas se prepararon empleando un agitador tipo hélice Heidolph R6L70 a una velocidad de 500 rpm a temperatura ambiente. En la Tabla 1 se presentan las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo cada uno de los experimentos.

Tabla 1. Condiciones experimentales para el reparto de las arcillas organofílicas.

Tipo de Arcilla	Conversión simulada de S (%)	% Surfactante	Masa (g)			
			arcilla	PB	PS	S
MMT-HDTMA	10	27,38	2,75	6	9,4	84,6
MMT-HDTMA	15				14,1	79,9
Cloisite 10A	10	38,82	3,42	6	9,4	84,6
Cloisite 10A	15				14,1	79,9

2% y 6% m/m para la arcilla y caucho respectivamente, para una masa total de 100 g de PS/PB/S

Las mezclas se prepararon dispersando inicialmente a la arcilla en el S durante 0,5 h. Seguidamente, se cortó la cantidad requerida del caucho PB en pequeños trozos y se procedió a su disolución agregándolo lentamente a la suspensión de arcilla-S. La dispersión se agitó durante 24 h a temperatura ambiente y en ausencia de luz para prevenir el entrecruzamiento del caucho. Posteriormente, se adicionó al matraz la masa de PS correspondiente a la conversión bajo estudio y se prosiguió la agitación hasta la completa disolución por 24 h adicionales.

Las fases de los polímeros incompatibles fueron separadas por centrifugación a una velocidad de 6000 rpm por 7 h en ciclos alternados de enfriamiento/centrifugación, con la finalidad de obtener una mayor eficiencia en la separación. Las fases se extrajeron con una jeringa de vidrio de 3 mL. Se aplicaron varios ciclos de centrifugación entre cada separación, cuando fue necesario, para prevenir la contaminación entre las fases durante la extracción. Las muestras se secaron bajo vacío a temperatura ambiente y en ausencia de luz hasta alcanzar peso constante. Para calcular la cantidad de material inorgánico presente en cada fase y evaluar la distribución de la arcilla, se procedió a su calcinación. Adicionalmente, se analizó cada fase por espectroscopia infrarrojo (FTIR) para identificar los componentes presentes.

Resultados

Modificación orgánica de las arcillas naturales

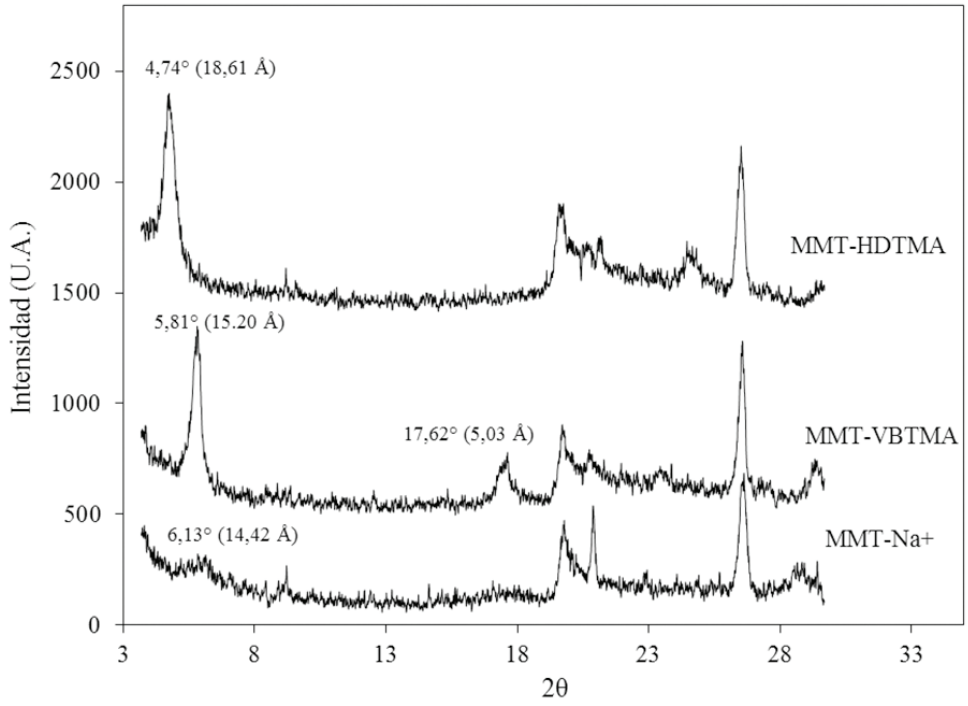
Efecto de la naturaleza del modificador orgánico

El efecto del tipo de surfactante en la hidrofobización de las arcillas naturales se evaluó modificando MMT-Na^+ con dos sales de alquil amonio: bromuro de hexadecil-trimetilamonio (HDTMA), el cual posee una larga cadena alquílica y el cloruro de vinil-bencil-trimetilamonio (VBTMA), que tiene un anillo aromático en su estructura (Figura 1).

La incorporación de las sales orgánicas en la montmorillonita sódica se siguió a través de la expansión interlaminar de la arcilla, tomando como referencia el espaciamiento basal d_{001}, a bajos valores de 2θ. La Figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos X de la arcilla virgen y de las arcillas modificadas empleando una concentración de surfactante de 1 CIC y una temperatura de 60°C. Los valores del espaciamiento basal d_{001} para las arcillas modificadas incrementaron debido al intercambio catiónico con los surfactantes de alquilamonio, siendo este aumento significativamente mayor al utilizar HDTMA. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor flexibilidad de la estructura de la sal alifática que facilitaría su intercalación dentro de las galerías de la arcilla. Adicionalmente, la rigidez y los efectos estéricos de los anillos aromáticos en el VBTMA justifican el menor grado de intercalación observado con este surfactante. Resultados similares fueron reportados por Avalos *et al*. [11] quienes utilizaron sales de cloruro de trifenil-vinil-bencil-fosfonio y bromuro de tetraoctil-fosfonio como modificadores orgánicos de montmorillonita sódica. En su estudio obtuvieron una mayor expansión de las capas de arcilla al emplear la sal con la cadena alifática, lo que condujo a la formación de una estructura exfoliada al preparar nanocompuestos de caucho natural.

La arcilla modificada con VBTMA presentó una señal a 2θ= 17,62°, correspondiente a una distancia interplanar de 5,03 Å, a diferencia de aquellas modificadas con HDTMA. Este pico de reflexión no se encuentra en la arcilla virgen (Figura 2) por lo que se infiere que es producto de un arreglo molecular del surfactante en el espacio interlaminar inherente a la presencia del anillo aromático en su estructura.

Figura 2. Patrones de difracción de rayos-X para la MMT-Na^+ sin modificar y modificadas con HDTMA y VBTMA. [Surfactante]= 1 CIC, T=60°C.



Efecto de la temperatura en el proceso de modificación

Los espaciamientos basales obtenidos a partir de los espectros de difracción de rayos X de MMT-Na^+ modificada con HDTMA y VBTMA a diferentes temperaturas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Espaciamientos basales de la MMT-Na$^+$ modificada orgánicamente a diferentes temperaturas.

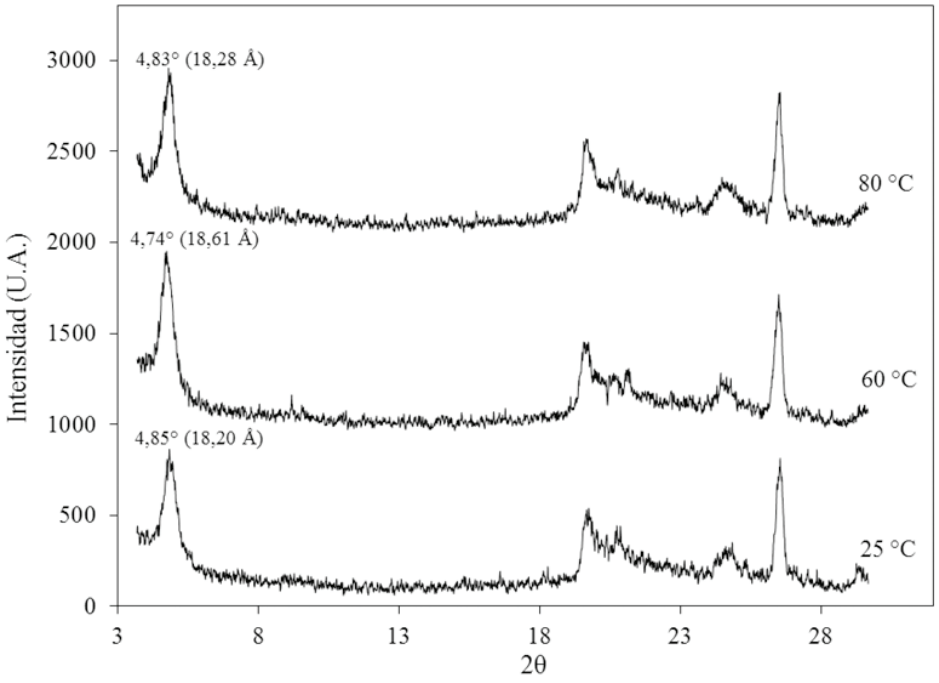
Modificador Orgánico[a]	Temperatura (ºC)	Espaciamiento Basal (Å)
HDTMA	25	18,20
HDTMA	60	18,61
HDTMA	80	18,28
VBTMA	25	15,32
VBTMA	60	15,13
VBTMA	80	15,13

a: [Surfactante]=1 CIC

De acuerdo a los resultados, no se evidenciaron cambios relevantes en la distancia interlaminar de las capas de los silicatos con el incremento de la temperatura, en acuerdo con los resultados reportados por Pospíšil *et al*. [12]. En ese estudio, una MMT-Na$^+$ fue intercalada con cationes de octadecilamonio y luego, con moléculas de octadecilamina, dodecilamina y octilamina. Estos autores no observaron cambios en el primer pico de reflexión (d_{001}) al incrementar la temperatura de 80 a 150°C.

Los patrones XRD de las organoarcillas MMT-HDTMA preparadas a las temperaturas bajo estudio, no mostraron ensanchamiento en las señales correspondientes al espaciamiento basal (d_{001}) (Figura 3). Esto sugiere un arreglo ordenado de las moléculas de surfactante en el espacio interlaminar de la montmorillonita, que se mantuvo constante con el incremento de la temperatura en el proceso de modificación. Adicionalmente, los valores de espaciamiento basal en el orden de 18-19 Å, para las arcillas modificadas con HDTMA, reflejan un arreglo lateral de doble capa de las moléculas de surfactante de acuerdo al modelo propuesto por Bonczek *et al.* [13].

Figura 3. Patrones de difracción de rayos-X de MMT-Na$^+$ modificada con HDTMA a diferentes temperaturas. [Surfactante]= 1 CIC

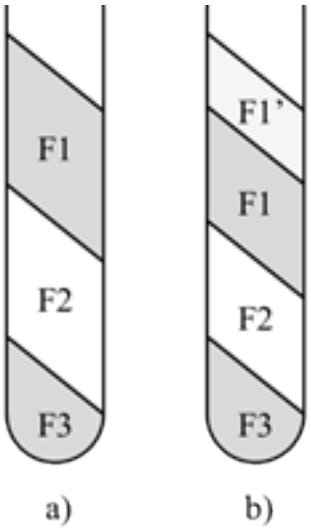


Distribución de las arcillas organofílicas entre las fases separadas en mezclas de PS/PB/S

Se prepararon mezclas de PS, PB, S y arcilla, simulando conversiones de S de 10 y 15%, con el objetivo de: a) analizar la distribución de las arcillas organofílicas entre las fases separadas obtenidas a partir de mezclas de los polímeros incompatibles y los aluminosilicatos y b) relacionar el reparto con la naturaleza del modificador de las arcillas bajo estudio y su afinidad con los componentes de las mezclas. Se usó la arcilla modificada con HDTMA (MMT-HDTMA), a una concentración de la sal de 1 CIC de la arcilla y a una temperatura de 60ºC, ya que estas fueron las condiciones en las cuales se obtuvo una mayor intercalación del modificador orgánico. No se realizaron mezclas de PS/PB/S con las arcillas modificadas con VBTMA a causa de la deficiente funcionalización obtenida con este surfactante.

Una vez sometidas las muestras al proceso de centrifugación, se observó que para la conversión simulada del 15% se separaron tres fases y para la del 10%, cuatro fases (Figura 4). Se identificaron los componentes de cada fase mediante FTIR y se determinó el porcentaje en peso de la arcilla en base a la masa total del material contenida en el tubo.

Figura 4. Esquematización de las fases obtenidas a las conversiones simuladas de S: a) 15%, b) 10%.



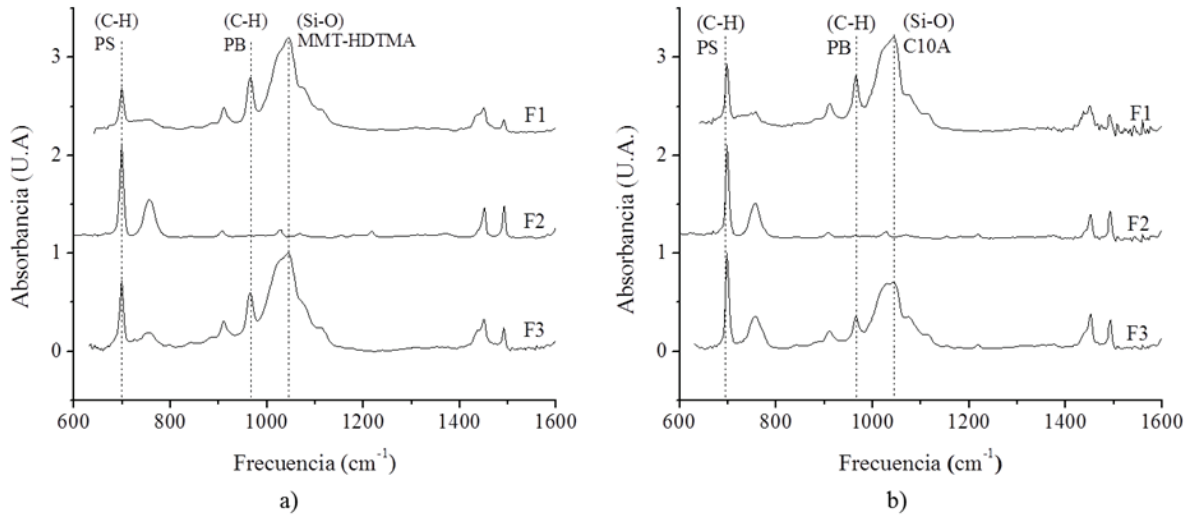
En la Figura 5 se muestran los espectros infrarrojo para las fases F1, F2 y F3 para las mezclas preparadas a una conversión simulada de S del 15%.

Para las fases F1 y F3, con ambos tipos de arcilla, se obtuvieron las siguientes señales características: a 699 cm^{-1}, que corresponde a la flexión del enlace C-H del grupo fenilo del PS; a 966 cm^{-1}, correspondiente a la flexión trans de los enlaces C-H fuera del plano del PB; alrededor de 1042 cm^{-1}, atribuible al modo de estiramiento de los enlaces Si-O en los silicatos.

Se observa que en ambas fases (F1 y F3) están presentes los dos polímeros constituyentes de la mezcla (PS y PB), por lo que se presume que la arcilla actuó como un agente compatibilizante, en la fase superior F1, entre la matriz continua de PB (polímero en mayor proporción en F1) y la fase dispersa de PS, y en la fase inferior F3, entre la fase continua rica en PS (polímero en mayor proporción en F3) y la discreta de PB.

Con respecto a la fase media (F2), solo se detectaron los picos de absorbancia característicos del PS y no se apreció la señal del silicato debido a la muy baja concentración de arcilla en esta fase (Tabla 3).

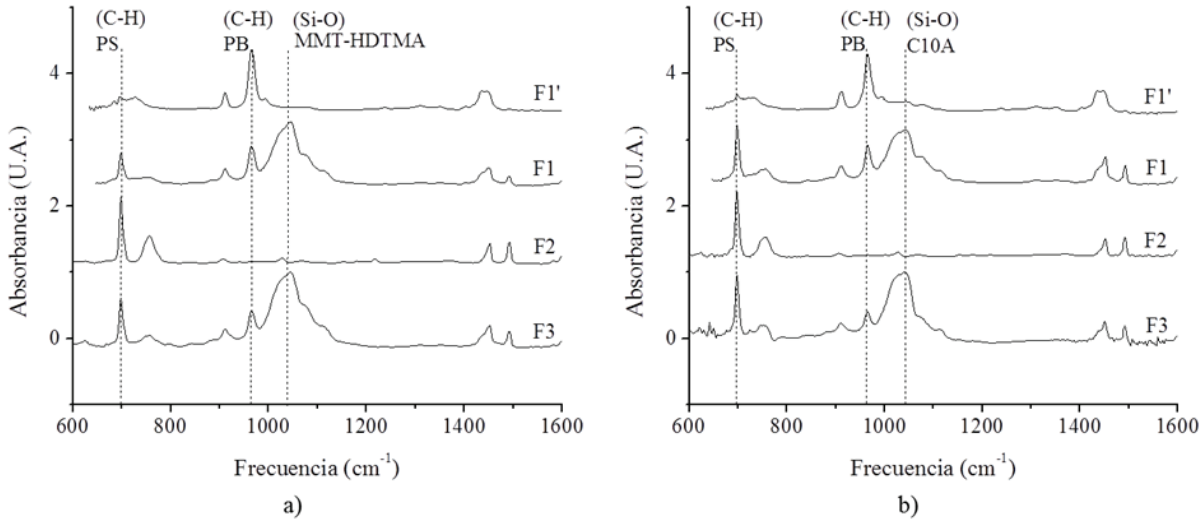
Figura 5. Espectros FTIR para las fases de la mezcla PS/PB/S/arcilla para una conversión simulada del 15%. a) MMT-HDTMA, b) Cloisite 10A.



De acuerdo a la revisión realizada por Fenouillot *et al* [14] sobre la distribución de nanopartículas en fluidos inmiscibles, se podrían proponer dos mecanismos diferentes para la compatibilización en las fases F1 y F3 donde coexisten los constituyentes de la mezcla. En la fase superior (F1), la arcilla posiblemente estaría confinada en la matriz continua de PB actuando como un obstáculo para la coalescencia de las gotas de PS/S. En la fase inferior (F3), la arcilla estaría presente en la interfase entre las gotas formadas por PB/S y la fase continua de PS/S, a una concentración tal que formarían una red rígida que inmovilizaría las gotas evitando de esta manera su coalescencia.

Como se mencionó anteriormente, cuando se prepararon las mezclas de PS/PB/S/arcilla a una conversión de S más baja (10%) se separaron cuatro fases, tal como se ilustra en la Figura 4. El espectro infrarrojo para la fase F1' mostró solo los picos de absorbancia asignables al PB (Figura 6). Los sólidos constituyentes de las fases F1 y F3 son el PB, PS y arcilla; mientras que la fase F2 sólo contuvo PS, comportamiento similar al anteriormente descrito y analizado para las fases obtenidas en las mezclas a una conversión del 15%.

Figura 6. Espectros FTIR para las fases de la mezcla PS/PB/S/arcilla para una conversión simulada del 10%. a) MMT-HDTMA, b) Cloisite 10A.



En la Tabla 3 se muestran los porcentajes en peso de arcilla en cada fase en base a la cantidad de arcilla total presente en el tubo de muestra. Se determinó que para las mezclas al 15% de conversión simulada de S, la fase rica en PB (F1) posee el mayor porcentaje de arcilla y este comportamiento fue independiente del tipo de silicato usado en la mezcla.

Tabla 3. Distribución de la arcilla entre las fases de las mezclas PS/PB/S/arcilla obtenidas gravimétricamente luego de la calcinación.

Tipo de arcilla	Conversión simulada de S (%)	Reparto de arcilla (%)			
		F1'	F1	F2	F3
MMT-HDTMA	10	0,90	56,78	0,82	41,50
	15	-	82,81	0,60	16,60
Cloisite 10A	10	0,38	44,81	0,21	54,60
	15	-	91,07	0,30	8,64

Este resultado puede interpretarse en función de:

1.- La migración preferencial de las partículas de arcilla a la fase de PB debido a la afinidad entre las cadenas alquílicas del surfactante intercalado en la arcilla comercial, Cloisite 10A y en la montmorillonita sódica modificada con HDTMA y el PB. Esta suposición se fundamenta en la alta solubilidad del PB en solventes alifáticos como el hexano y el heptano.

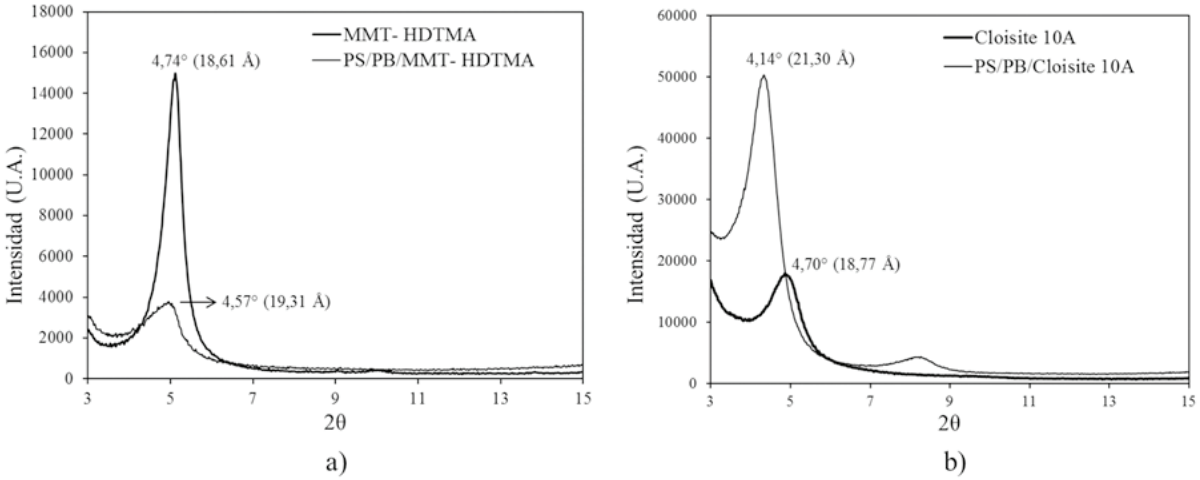
2.- La secuencia de adición de los componentes durante la preparación de las mezclas. En esta investigación el PB fue disuelto inicialmente en la dispersión de arcilla en estireno y posteriormente, fue adicionado el PS. Quizás el mayor porcentaje de arcilla obtenido en la fase rica en PB es producto de la retención del mineral en esta fase, debido a una pobre transferencia de la masa de arcilla de este medio altamente viscoso a la fase de PS/S de menor viscosidad.

Por otro lado, si bien existe similitud estructural entre el modificador orgánico empleado en la arcilla Cloisite 10A de naturaleza aromática y el PS, no se favoreció la migración de esta arcilla a la fase de PS (Tabla 3). Este comportamiento podría responder al efecto viscoso antes mencionado, o a la mayor afinidad del sustituyente aromático por el PB. Esta última afirmación es consistente con el hecho de que en las mezclas PS/PB/S, el estireno se concentra en la fase PB y no en la de PS [15], a pesar de la semejanza estructural entre el monómero y su homopolímero.

Para el caso de los ensayos con 10% de conversión simulada de S, se observó una distribución de la arcilla proporcional entre la fase rica en PB (F1) y en la fase rica en PS (F3). Es posible que este comportamiento esté influenciado por la menor viscosidad del medio que ocasiona que parte del silicato precipite durante el proceso de centrifugación.

Adicionalmente, se analizó por XRD la morfología de los nanocompuestos de PS/PB/MMT-HDTMA y PS/PB/Cloisite 10A, presentes en la fase superior (F1) de las mezclas preparadas a una conversión simulada de S del 15%. En la Figura 7, se muestran los patrones de difracción de los nanocompuestos descritos y de las arcillas MMT-HDTMA y Cloisite 10A.

Figura 7. Difractogramas XRD de los nanocompuestos: a) PS/PB/MMT-HDTMA, b) PS/PB/Cloisite 10A.



Se observa un incremento del espacio interlaminar de la arcilla en los nanocompuestos, permaneciendo un cierto orden de las partículas de arcilla, lo que sugiere una morfología intercalada del material. Sin embargo, los espaciamientos basales del plano 001, indican un bajo grado de intercalación de las moléculas de polímero entre las capas de silicato. Por otra parte, se aprecia una mayor afinidad de los polímeros por la arcilla comercial, debida probablemente a la mayor fracción másica del modificador orgánico en esta arcilla (38,82%), con respecto a la modificada en este estudio con HDTMA (27,38%) y a la naturaleza aromática del surfactante en la arcilla Cloisite 10 A.

Conclusiones

El grado de intercalación obtenido para la montmorillonita sódica fue mayor con la sal de amonio alifática (HDTMA) que con la sal de amonio aromática (VBTMA) debido a la rigidez y a los efectos estéricos del anillo aromático.

En las mezclas de PS/PB/S/arcilla con la mayor cantidad de PS, las organoarcillas MMT-HDTMA y Cloisite 10A se concentraron preferentemente en la fase rica en PB y se comportaron como compatibilizantes en la polimezcla. El mecanismo de compatibilización dependió de la naturaleza de las fases continua y dispersa.

El análisis XRD arrojó que los nanocompuestos presentes en la fase superior rica en PB, para las mezclas con una mayor conversión simulada de S, presentaron una morfología intercalada. Se apreció un mayor grado de intercalación en la mezcla preparada con la arcilla comercial Cloisite 10A con respecto a aquella preparada con la arcilla modificada con HDTMA.

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES) por el apoyo económico brindado a través del proyecto CC-0520-11.

Al Instituto de Superficies y Catálisis (INSUC) por su colaboración en la realización de los FTIR de las muestras de mezclas polímero/arcilla.

Al Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT) por el análisis XRD.

Referencias bibliográficas

1. Arora A., Choudhary V. y Sharma D.K. Effect of clay content and clay/surfactant on the mechanical, thermal, and barrier properties of polystyrene/organoclay nanocomposites, Journal of Polymer Research, Vol. 18, (2011), 843-857.
2. Ranya S., Qiao G., Powell C. y Bateman S. Effect of surfactant architecture on the properties of polystyrene-montmorillonite nanocomposite, Langmuir, Vol. 26, Nº 11, (2010), 9023-9031.
3. Xie W., Hwu J. M., Jiang G. J., Buthelezi T. M. y Pan W.P. A sudy of the effect of surfactans on the properties of polystyrene-montmorillonite nanocomposites, Polymer Engineering and Science, Vol. 43, Nº 1, (2003), 214-222.
4. Kurian M., Dasgupta A., Beyer F. y Galvin M. Investigation of the effects of silicate modification on polymer-layered silicate nanocomposite morphology, Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 42, (2004), 4075-4083.
5. Dazhu C., Haiyang Y., Pingsheng H. y Weian Z. Rheological and extrusion behavior of intercalated high-impact polystyrene/organomontmorillonite nanocomposites, Composites Science and Technology, Vol. 65, (2005), 1593-1600.
6. Su S., Jiang D. y Wilkie C. Polybutadiene-modified clay and its nanocomposites, Polymer Degradation and Stability, Vol. 84, (2004), 279-288.
7. Zhang J., Jiang D.D., Wang D. y Wilkie C.A. Mechanical and fire properties of styrenic polymer nanocomposites based on an oligomerically-modified clay, Polymers for Advanced Technologies, Vol. 16, (2005), 800-806.
8. Uthirakumar P., Hahn Y. B., Nahm K. S. y Lee Y. S. Exfoliated high-impact polystyrene/MMT nanocomposites prepared using anchored cationic radical initiator-MMT hybrid, European Polymer Journal, Vol. 41, (2005), 1582-1588.
9. Bagcioglu C., Sen S., Yagci Y., Nugay T., y Nugay N. Preparation of super HIPS via nanocomposite assemblies in the presence of toughener-intercalant, e-Polymers. Vol. 8, (2008), 1119–1130. http://www.degruyter.com/view/j/epoly.2008.8.issue-1/epoly.2008.8.1.1119/epoly.2008.8.1.1119.xml
10. Sánchez-Olivares G., Sánchez-Solis A. y Manero O. Effect of montmorillonite clay on the burning rate of high-impact polystyrene. International Journal of Polymeric materials, Vol. 57, (2008), 245-257.
11. Avalos F., Ortiz J.C., Zitzumbo R., López- Manchado M.A., Verdejo R. y Arroyo M. Effect of montmorillonite intercalant structure on the cure parameters of natural rubber, European Polymer Journal, Vol. 44, (2008), 3108-3115.
12. Pospíšil M., Kalendová A., Čapková P., Šimoník J., y Valášková M. Structure analysis of intercalated layer silicates: combination of molecular simulations and experiment, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 277, (2004), 154-161.
13. Bonczek J. L., Harris W. G., y Nkedi-Kizza P. Monolayer to bilayer transitional arrangements of hexadecyltrimethylammonium cations on Na-montmorillonite, Clays and clays minerals, Vol. 50, Nº 1, (2002), 11-17.
14. Fenouillot F., Cassagnau P. y Majesté J.-C. Uneven distribution of nanoparticles in inmiscible fluids: morphology development in polymer blends, Polymer, Vol. 50, (2009), 1333-1350.
15. Ludwico W. A. y Rosen S. L. The kinetics of two –phase bulk polymerization. I. Monomer and initiator distribution, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 19, (1975), 757-768.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Estudio del comportamiento de las redes sónicas de alta velocidad

Luis Rojas[1,2]

[1] Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería.
Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Estado Zulia. Venezuela.

[2] Laboratorio de Electrónica y Control. Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia. Maracaibo, Estado Zulia. Venezuela.

luisrojascedeno@yahoo.es

Recibido: 15-06-2015 Aceptado: 07-07-2015

Resumen

Con este trabajo se pretende profundizar los conocimientos sobre temas tan importantes, como son la Modulación por División de Longitud de Onda, las Fibras Ópticas Aéreas, la Modulación por División de Onda Densa, y la influencia que ejerce sobre las redes de alta velocidad, la Dispersión por Modo de Polarización. Conjuntamente, se explican los efectos conocidos como Fluctuación de Fase (Jitter), y el Wander, tan comunes en estas redes. Se estudia, el comportamiento de redes ópticas tanto aéreas, como subterráneas, las redes ópticas Metropolitanas MAN, y de área extensa WAN. En estos momentos, las empresas de telecomunicaciones requieren de personal altamente calificados para instalar y mantener redes de alta velocidad, donde se hace prescindible que los operadores puedan tener dominio del estado del arte de las redes de alta velocidad.

Palabras clave: Modulación por división longitud de onda, modulación por división densa, dispersión por modo de polarización, fluctuación de fase, Wander.

Study of performance of networks sonic high speed

Abstract

The intention of this study is to deepen the knowlege on subjects as important as: Wavelength Division Modulation (WDM), Dense Wavelength Division Modulation (DWDM) and influence it has on high-speed networks, the Polaritation Dispersion Mode (PDM) together, they explain the efeccts known as Wander, Jitter. The behavior of underground and overhead optical networks, both in Metropolitan Area Networks (MAN) and wide area networks (WAN) at this time´in the companies that operate high-speed networks it is necesary that the administrators are fully award of the state the art of such neworks.

Key words: Wavelength division modulation, dense wavelength division modulation, polaritation dispersion mode, fluctuation of fase, Wander.

Introducción

La técnica de Multiplexar, o sea, enviar por una sola fibra longitudes de onda en un sentido Tx y recibir otras longitudes de onda en otro sentido Rx, ha sido una de las grandes soluciones en las redes de fibras ópticas. La Multiplexión por División de Longitud de Onda (WDM), viene a convertirse en la piedra angular de las comunicaciones ópticas a baja, media y alta velocidad. En este trabajo, nos enfocaremos a analizar algunos aspectos que afectan a las redes ópticas de alta velocidad.

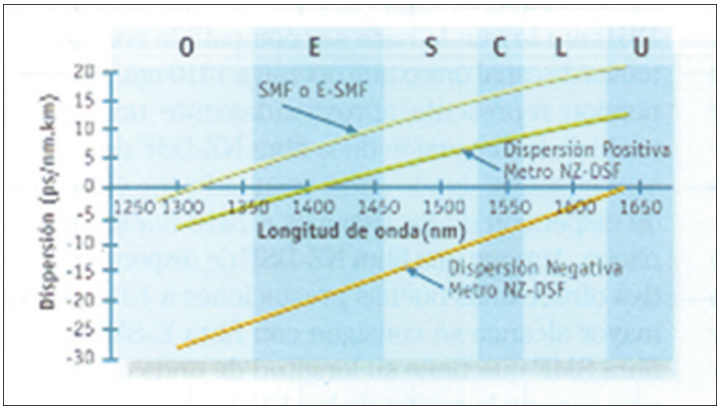
Se denomina Multiplexión por División de Longitud de Onda (WDM), a la técnica de dividir el espectro de una señal en diferentes longitudes de onda (λ). Este trabajo pretende mostrar algunos aspectos que rigen el comportamiento de las señales ópticas multiplexadas usando la técnica WDM. Igualmente se agregan notas sobre Sincronismo, se estudian las características de la Dispersión por Modo de Polarización (PDM), y se plantean algunas observaciones sobre el comportamiento de las fibras aéreas.

Si analizamos como influye el ruido en un sistema de transmisión WDM, podemos afirmar que el ruido no aumenta con WDM [1]. Es decir, cierta parte del ruido aumenta en la parte no lineal causada por pérdidas de retorno; es un tipo de ruido de intermodulación causado por una curva no plana de retardo de grupo. Transmitiendo a 64 Kbps con WDM, hay que subir la potencia del Láser, porque la potencia no llega al final de la fibra. Se nota que hay una lectura que indica que existe una fracturación de la fibra y existen otros problemas también como son la Dispersión de Ramán [2], y la Dispersión de Brillouin [3] [4] que es un efecto no lineal en el propio medio de transmisión; entonces, es complicado transmitir potencias bajas a una velocidad de 64 Kbps. Siendo este un factor limitante de WDM. La Multiplexión por División de Onda Densa (DWDM), limita la velocidad binaria porque la Dispersión por el Modo de Polarización (PMD) también limita ésta velocidad. Este problema que se origina cuando usamos varias longitudes de onda; son producto de distorsiones no lineales, principalmente una distorsión no lineal que podemos definirla como producto del reparto de grupos causada por el desplazamiento y dispersión de la fibra.

En el pasado, la Fibra Monomodo tenía dos componentes de atenuación; Atenuación por absorción y Atenuación del Material. La Atenuación del Material es mínima en la ventana de 1550 nm. Existe otro parámetro: la Dispersión, como es la Dispersión Cromática; entonces, tenemos la Dispersión del Material y la Dispersión Cromática; estas dos dispersiones tienen un punto mínimo en la ventana de 1310 nm, pero como se quiere transmitir donde exista menos atenuación por absorción; se trata de desplazar el punto de dispersión mínima hasta 1550 nm; la curva de dispersión cruza con el punto de atenuación mínima, esta fibra se denomina: Fibra por Desplazamiento "Shifted Fiber".

Se puede actuar sobre la dispersión en el material, cambiando el material de dopaje de la fibra, cambiando la posición en que la Dispersión del Material y la Dispersión Cromática se anulan mutuamente, y se llega a la dispersión cero, tal como lo muestra la figura 1.

Figura 1.



El problema es que el punto de dispersión cero está en la ventana de 1550 nm. La pendiente de la curva de dispersión es muy grande. Esta pendiente grande incide en el intervalo de grupo, la variación del Índice de Propagación es muy fuerte con la frecuencia; entonces, el punto de dispersión coincide con una pendiente grande de la dispersión, después se estabiliza un poco.

Entonces, es mucho mejor si se quiere ocupar el enorme ancho de banda de la fibra con un ancho de banda pequeño. Por ejemplo, si tenemos un solo canal óptico, y estamos trabajando en un canal de 10 o 20 GHz de ancho de banda; así tenga la pendiente muy grande; en 10 o 20 GHz es muy pequeña la variación absoluta del tiempo de propagación; ahora, si trabajamos con varios canales; entonces, ésta pendiente grande causa DGD (Retardo Diferencial de Grupo) (ΔT) [5].

$$\Delta T = \left| \frac{L}{V_{gx}} - \frac{L}{V_{gy}} \right| = L\left|B_{1X} - B_{1Y}\right| = L\Delta B1 \tag{1}$$

Donde:

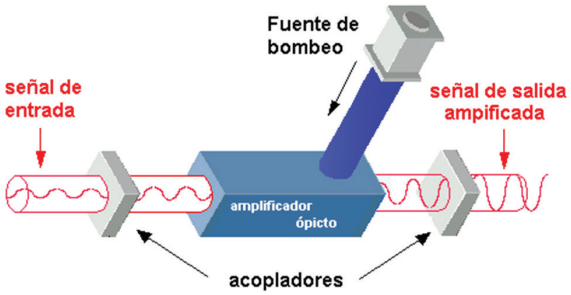
L: longitud de la fibra; x,y: son subíndices que identifican los dos modos ortogonales polarizados.

$\Delta B1$: describe la doble refracción de la fibra; la expresión: $\frac{\Delta T}{L}$, mide la cantidad de PDM.

El tiempo de propagación empieza a causar Ruido de Intermodulación entre las portadoras y este es el problema de las fibras de Erbium. Por eso, es que desde los años 90-95, más o menos la gente comenzó a usar fibras de Erbium [6]. La fibra de Erbium no permite que se trabaje con WDM de Erbium. No se puede usar WDM en 1550 nm; este es el problema de la fibra de Erbium, no sirve para transportar WDM en 1550 nm.

Lo único que se puede hacer es utilizar un tramo de fibra con un material de dopaje con una Dispersión del Material transparente que regrese a ese punto de pendiente mayor. Pero, una Dispersión del Material tan grande que tiene un sentido opuesto a la inclinación, se trata de colocarla más plana que antes.

Figura 2.



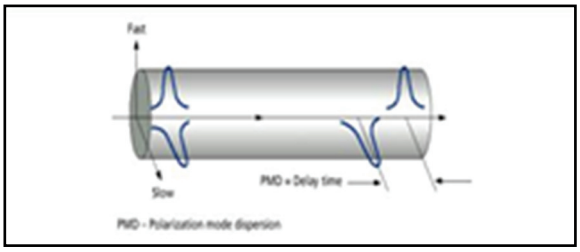
Hoy, existen compensadores de dispersión para una fibra para WDM. Actualmente se usa una fibra Non- Dispersion-Sifted que da un valor de baja dispersión en 1550 nm. Este trabajo fue estructurado de la siguiente forma: En la sección 2, se hace un análisis sobre el comportamiento de una red a alta velocidad, cuando es afectada por la Dispersión por Modo de Polarización. En la sección 3, se explica de forma somera como afecta la PDM, a las fibras aéreas. La sección 4 está dedicada al estudio de la Multiplexión por Longitud de Onda Densa (DWDM). Al final, en la sección 5 mostramos las conclusiones y referencias Bibliográficas.

Dispersión por modo de polarización (PDM)

El PDM es un fenómeno estadístico, que es causado por problemas mecánicos de la fibra. Cuando se adquiere la fibra, ella viene no polarizada, luego se la acoplas, la polarización se da en dos planos en todo el área, siendo demostrada ésta polarización utilizando las ecuaciones de Maxwell [7].

La luz se polariza cuando entra a la fibra, al polarizarse el rayo de luz, se propaga en un plano y en el otro también. Si la fibra tiene fenómenos constructivos o de instalación, la polarización del núcleo se ve afectada, o si tenemos índices de refracción distintos para los dos planos de polarización (Fenómeno de Bi-Refrigencia) [8], lo que va a ocurrir es que en el camino físico de la fibra, la luz se refleja en la superficie del núcleo y en el recubrimiento va rebotando a lo largo de ésta.

Figura 3.



Existe un fenómeno geométrico en las fibras, si los puntos de reflexión no son los mismos para los dos planos de polarización; entonces, cuando la luz llega al otro lado, la luz que se propagó en un plano está atravesada con respecto a la que se propagó en el otro plano; entonces se presenta el fenómeno de "Multi Trayectoria"; eso es lo que hace la PDM, se produce el Retardo de Grupos Diferencial para dos modos de propagación de igual potencia, entonces tienes dos trayectorias: un trayecto directo y un trayecto reflejado atrasado, "y, eso apaga algunos canales de la fibra, en el trayecto corto". El retardo diferencial es tan pequeño que pueda ser despreciado en estos trayectos cortos; en los trayectos largos, se torna más complicado; entonces, en trayectos de 50 a 70 km, el Retardo Diferencial de Grupos constante empieza a causar problemas..

Valor de la Raíz Cuadrada de ΔT :

$$\vartheta_t^2 = \Delta T^2 = \frac{1}{2}\Delta B^2 h^2 \left[\frac{2L}{h} - 1\,\ell^{\frac{-2L}{h}}\right] \tag{2}$$

Esta ecuación caracteriza al PDM, y se obtiene promediando con la ayuda de la perturbación aleatoria; donde h es el parámetro que mide la longitud de correlación.

$$\vartheta \approx \Delta \mathrm{B1}\sqrt{hL} = \mathrm{Dp}\sqrt{L} \tag{3}$$

Si fueran puros fenómenos constantes constructivos, se pudiera controlar; pero, cuando se va a instalar la fibra, los técnicos instalan fibras con un núcleo más curvo que lo que debería tener, y el núcleo al perder simetría aparecen unas pequeñas deformaciones de la fibra que sólo afecta a uno de los dos planos de propagación, por eso se tiene un núcleo no alineado y tendríamos problemas para empalmar, tendríamos empalmes defectuosos. Todo eso ocasiona PDM. El PDM depende de la calidad de construcción de la fibra y de la calidad de instalación de esta, y eso si es que la fibra tiene problemas de PMD, para 10 Mbps es muy grave.

No es problemático PDM para WDM, es problemático apenas para 10 Mbps, entonces DWDM es importante porque el valor de PDM solo afecta a la trayectoria de los pulsos muy pequeños, los pulsos grandes presentan un error de falla que no es apreciable; no afecta en casos prácticos. Aun no existe un compensador perfecto de PDM. Tiene que haber un mecanismo que mida constantemente PMD para compensar ¿Que hace un compensador de PMD?: toma la luz polarizada y divide en un polarizador horizontal por un camino y el vertical por otro camino, que es lo mismo que un Ecualizador Diferencial Transversal Automático para Radio.

Una fibra es afectada cada 10 km. En una red la fibra "sufre" problemas constructivos. Actualmente, las empresas que realizan empalmes de fibra están obligadas a presentar las medidas de PMD antes y después de empalmar. Esto, está generando un problema muy grave porque antes de 1998 nadie había medido la PDM. Las empresas tienen que preparar a su personal en PDM y elaborar una metodología para instalación, comprar instrumentos y una nueva técnica de empalmes

Fibras aéreas

En las fibras aéreas, es complicado el problema de Wander, efecto apreciable debajo de los 2 Hz; porque el Índice de Refracción de la Fibra en la Velocidad de Propagación en el Vacío, está dividido entre la velocidad de propagación del medio. Si el índice de refracción cambia, lo que está variando es la velocidad de propagación de la onda electromagnética de la fibra. Cuando cambia el índice de refracción con la temperatura, hay una fluctuación de fase de la señal sobre los 10 Hz (Jitter) y tiene el mismo ciclo de la temperatura [9]. Entonces, la fibra aérea principalmente sufre mucho gradiente de temperatura y mientras más aumenta el gradiente, hay más variación de la temperatura.

Cerca de la costa la temperatura varía 10°C entre la noche y el día, pero en la zona montañosa varía entre 30 y 40°C, esta variación de temperatura causa una fluctuación de fase muy grande de varios nanosegundos; porque, si varía la velocidad cambia la fase. Cuando varía la velocidad en un tramo largo; entonces, la variación de fase es muy grande y puede alcanzar varios ciclos.

Bajo tierra no hay mucho gradiente de temperatura, hay mucha fibra aérea aprovechando ya la estructura instalada.

Multiplexión por división de onda densa (DWDM)

WDM comenzó al inicio de los 90 para poder tener dos señales en la misma fibra utilizando las dos ventanas 1310 y 155nm, los láseres de entonces no eran muy estables, no había filtros muy angostos, era un sistema WDM con una baja capacidad en dos ventanas básicas. Después, vino un sistema WDM con 4 canales, u 8 canales en la ventana de 1550 nm. ¿Por qué se eligió la ventana de 1550 nm?

1- Debido, a que tiene más baja atenuación que 1310 nm, y porque tienen menor Dispersión Cromática.

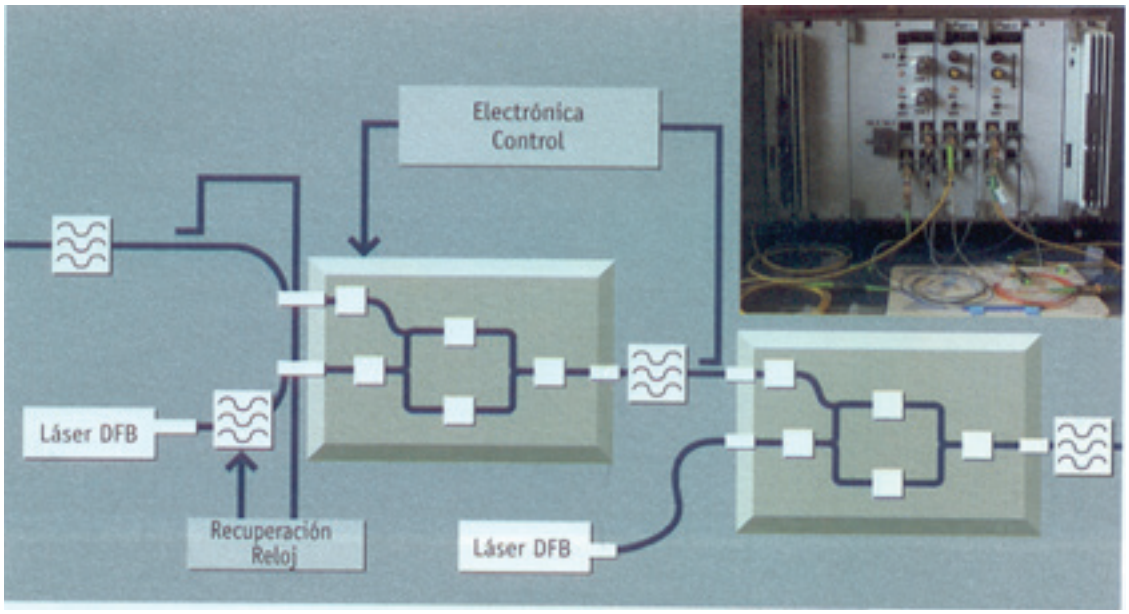
2- Porque, entre 1310 y 1550 nm las frecuencias absorbidas por los radicales libres OH+ hoy en día se puede utilizar una fibra nueva. La fibra OWPG, no contiene radicales en los picos de absorción y se puede utilizar toda la banda entre 1310 y 1550 nm. Además, como es plástica, es una fibra que tiene mayor atenuación, no sirve para nada en WAN pero si para redes MAN.

Entonces, permite tener 1000 canales ópticos en redes metropolitanas. ¿Por qué WDM en 1310 y 1550 nm?, ¿Por qué en 1550 nm en larga distancia?: Porque, hay menos atenuación, hay otra razón también: ¡Amplificadores Ópticos!, ya que los únicos amplificadores ópticos, utilizando un principio de mecánica cuántica consiste en una corriente gradual fotónica de frecuencia más alta; implica, una longitud de onda baja. Entonces, en 1550 nm en una banda útil de 1480 nm, normalmente es la frecuencia de la corriente fotónica fuera de banda [10] y es en esa frecuencia donde trabaja el Erbium, en un tramo de 20 a 30 m de fibra dopada con este elemento. Uno, puede medir esta corriente fotónica con un filtro de alta frecuencia en la salida, con un filtro paso bajo; pero, entra en resonancia con los fotones de la corriente fotónica débil que trabaja en una banda de frecuencia normal, entonces parte de la energía de la frecuencia alta se convierte en energía de frecuencia baja y eso da una ganancia de la corriente débil de 30 dB y ese es el medio por el material de dopaje de la fibra que se transmite en la ventana de 1550 nm. Solo funcionan con un dopaje de Erbium en 1550 nm.

La gran ventaja de los amplificadores en banda ancha, es que un amplificador es mucho más barato que un regenerador; un regenerador pasa de óptico a eléctrico, realiza la recuperación del reloj, se ejecuta el muestreo de los bits y la modulación del otro lado.

El amplificador toma la corriente fotónica de los bits de los fotones de energía y agrega más fotones de energía y voltaje de carga; que resulta mucho más barato que un regenerador 3R.

Figura N°4.



Se llama regenerador 3R, porque Re-muestrea, Retransmite y Regenera los amplificadores de banda ancha todos los fotones que transmite. Lleva un fotón de energía de +30dB, ¡30 dB es mil millones de fotones!. Entonces, los amplificadores sirven para largas distancia en el orden de los 300 Km, hoy en día hay sistemas de más de 600 Km sin regenerador 3R:¡sin usar Solitons!; Con Solitons funciona a 100000 Km pero con pulsos ópticos normales, no pulsos pre-distorsionados, que lo hacen en 600 Km, con 3 amplificadores intermedios, un buffer y un preamplificador.

Un amplificador en el transmisor, uno en la recepción y tres de por medio se logra llegar a 600 Km sin tener que regenerar. El problema es que cada vez que se amplifica la señal, "también amplifica el ruido de fondo" y agrega un ruido térmico, y una corriente fotónica producto de lo que se denomina "Emisión Espontánea".

Existe un ruido térmico en cualquier equipo electrónico (La Emisión Espontánea) producido por el movimiento molecular en la emisión de fotones; el problema es, que cuando se emiten fotones y pasa por un amplificador de 30 dB, esa Emisión Espontánea se amplifica. Después de pasar por 5 amplificadores este ruido se vuelve considerable, y es el factor limitante y es por eso que con Solitons la cosa funciona mejor; los pulsos son más cortos y puedo amplificar 20 veces más. Pero, como el pulso es angosto, va corriendo el pulso en frecuencia y cada vez que se amplifica, también, se amplifica el ruido en aquella frecuencia; pero, se corta el ruido, no la frecuencia, se puede cambiar la frecuencia. Se está experimentando para 10 Gbps y 40 Gbps.

Cuando se plantea ampliar la capacidad de los sistemas, hay dos posibilidades:

a. Un aumento de la capacidad binaria
b. Uniendo más portadoras.

Aumentar la capacidad binaria, significa tener que sacar todos los equipos, incluidos los regeneradores y cambiarlos por equipos que trabajen con más precisión y con pulsos más cortos. Aumentar la velocidad binaria es muy problemático, una de las razones es que el pulso es más angosto, entonces hay problema de reloj, el segundo problema es que trabajar con pulsos más angostos; entonces, el ensanchamiento absoluto es relativamente más impactante.

La Dispersión Por Modo de Polarización (PDM) "por el esfuerzo, es peor para los pulsos angostos"; Entonces no podemos hacer la transmisión de 0.5 Gbps a 10 Gbps. Ese es el problema, que solo 10 dB o más esfuerzo es el que se necesita, porque los impulsos más cortos llevan menos energía; la energía por bit sobre la densidad espectral de ruido disminuye porque la RSN disminuye, la energía útil al ruido debe ser menor. Hay un montón de razones por las cuales no sé puede pasar de la tasa de transmisión de 10 Gbps, y estos 10 Gbps dan una ganancia apenas de 4 dB a su mayor capacidad.

Por tanto, WDM lo que permite, es que se tenga que ir eliminando menos portadoras dentro del sistema. Por lo cual podemos decir, que si agrego menos portadoras; entonces, se necesitan muchos Mux y Dmux,; o mejor, lo mismo que el radio que usa Circuitos Sintonizados, Circuladores, Acopladores Direccionales para la transmisión y Circuladores para la recepción, un árbol de derivación. Toda Fibra que usa WDM necesita una calidad de resonancia, oscilando a la frecuencia correcta.

En las redes de área local (LAN), no se necesita amplificar; los mismos equipos SDH (Jerarquía Digital Síncrona) en redes metropolitanas (MAN) usan una ventana de (1520 - 1565) nm .

Esta ventana que debe ser amplificada no tiene ruido interferente, o sea el ruido de 48 nm de la banda no entra en la ventana de (1520-1565) nm y se tiene todavía 45 nm; 45 nm, significa 4.5 THz y 4.5 THz si se divide en 40 canales 10/5 THz que caben en cada canal,

Se puede tener 100 GHz y eso es lo que se usa, se toma la banda de 45 nm, los 40 nm centrales se dividen en 40 Canales de 0.8 nm, en canales de 1nm de ancho de 0.8 nm y 0.8 nm equivalen en esa banda a 100 GHz.

Como puede observarse en la figura 1, el sistema funciona con 8 portadoras en la banda de baja distorsión, después de 8 portadoras en la banda de baja frecuencia; luego, si eso se lo permite sé sigue con 8 más, esparcidas de 200 GHz de 1.6 nm y después se puede si el sistema tiene bajo ruido, ir colocando más portadoras, incluso tener un total de 40 portadoras, esa banda recibe el nombre de banda "C" y es la primera que se está usando.

Luego hay otras bandas que se pueden utilizar, la siguiente es muy cara todavía y 40 portadoras no alcanzan, se debe introducir un sistema de canales más robustos, en canales de 50 GHz, las luces tienen esa solución, trabajan con canales de 50 GHz, a 0.4 nm, le caben 80 canales en vez de los 40 canales originales; es decir, se extiende la banda.

Se utiliza la banda L (long ware) "Onda larga", en frecuencias bajas (1565 -1620) nm, la atenuación es mayor pero los amplificadores lo compensan y después viene la banda corta S (Short ware) (en 1460-1510nm), en la amplificación no la puedo utilizar sin fibra que no tenga dispersión positiva. Lo convencional hoy es la banda tradicional WDM los filtros son cavidades resonantes. (GRÁFICA DE DISPERSION)

Si apreciamos el espectro donde está la banda de (1530-1565) nm, se nota que aparecen los 8 primeros canales, los otros 8 son curvos, luego los otros 24 que forman parte del ancho de banda de los filtros de cada canal; o sea el ancho de banda del ruido. El filtro es de 50 GHz, 0.4 nm es la banda de ganancia entre dos portadoras adyacentes.

La frecuencia más alta es la de la luz (ultravioleta). Normalmente, cuando se compra un sistema WDM, se adquiere un sistema de 4 canales, de 8 canales, de 16 y de 40 canales. Los Mux son cadenas

sobre acopladores direccionales ópticos. Son pedazos de fibras empalmadas en Y griega, y se logran acoplar las señales ópticas, tenemos una pequeña pérdida de inserción y los derivadores son acopladores direccionales por generadores de potencia.

Hoy en día los elementos son programables Cross-Connet, se trabaja con un acoplador ADM configurable, la empresa Alcatel por ejemplo, usa la misma plataforma de gestión de SDH.

Estos ADM son configurables todavía en electromecánicos, a partir del 2000 aparecieron los equipos con conversión de voz y los convierte en longitud de onda, se multiplexa y hay un convertidor de longitud de onda. Un convertidor de onda en un dispositivo, un amplificador que cambia la frecuencia de la onda, y al mismo tiempo que amplifica entra con una frecuencia, sale con otra en una especie de mezcla de frecuencias.

Podemos crear una red de caminos asociada al tiempo y dependiendo de la frecuencia a la cual se puede convertir la longitud de onda en la entrada se elige cuál es el camino para seguir una malla; entonces, teóricamente se puede conmutar muy rápido, la ventaja de los Crossconnet con los conmutadores de longitud de onda es que son más baratos que los de rotación de prisma, que son más rápidos, estos equipos son la base de los conmutadores ópticos que comenzaron a aparecer en los otros equipos. Las centrales de conmutación ópticas, conmutan miles de voces por segundo en paquetes ópticos, esos equipos pueden actuar; o sea, cambiar la ruta, por ejemplo una de las teorías es que cada central de conmutación óptica va a recibir un paquete cada microsegundo.

La Crossconnet con longitud de onda en lo que se quiere para sustituir ATM (Modo de Transmisión Asíncrono), eso sería el próximo grupo de la red, la red del futuro tendrá tres capas de conmutación de celdas para baja capacidad, si es menos de 2 Mbps en la velocidad del ATM; si es mayor de 2 Mbps es conmutación óptica y allí hay dos tipos de conmutación, conmutación espacial y la conmutación temporal. La espacial es para circuitos que duran más tiempo y la temporal es para conmutación de paquetes.

Algún día esta será tan económica, que va a reemplazar la red electrónica por lo menos para elementos de alta capacidad y altas velocidades binarias. Por ejemplo haciendo paquetes IP con 125 μs y conmutar 8000 veces por segundo, se puede definir paquete por paquete cual es el camino de la acción conmutadora. Esto significa que 125 microsegundos trabajando con ½ giga del paquete, tiene que ser de gran tamaño, entonces no va a ser con ese paquete apenas, se va a necesitar de IPLS para guardar un montón de paquetes IPL en esa trama, pues rodeados de conmutadores temporales de más de 8000 paquetes/ seg, lo más que se está discutiendo hoy son 8000 paquetes/seg. Pero, ½ giga x 1 paquete en 125 μs son muchos bytes.

Hoy en día se utiliza el sistema encendido o apagado y el reduce el ancho de banda ocupado siendo menor de 0.1 nm.

Con el Láser modulado en intensidad en un Giga, el canal debe ser 0.1nm equivalente a 2Ghz, pero en el futuro, si se necesita de mayor capacidad moduladora en FSK; tendremos un Láser trabajando a un GHZ para 1Gbps. PSK tiene un espectro más chico de amplitud; si modulo en FSK solo aparecerán dos raíces centrales. Si se modula con 1Gbps en binario sólo aparecen raíces centrales, aquí no, solo armónicos.

Cuando se trabaja con esas portadoras, una de las cosas que se mide, es la potencia de la portadora y podemos sincronizar la portadora y ver si el calor viene atrapado en la variación de la potencia, y así conocer la estabilidad de la potencia. La estabilidad de la potencia, fija la frecuencia de barrido: el equipo que se usa es el mismo que el de radio, se mide la frecuencia de la portadora, se mide la potencia y la RSN. Se entiende que la temperatura disminuye la potencia S/N, y a lo largo del día. Al final, esas son las condiciones que se harán: RSN, Potencia, y frecuencia.

Conclusiones

Con este artículo se ha intentado describir algunos conceptos fundamentales de las comunicaciones ópticas, poco mostrados en los textos de pregrado. Este trabajo, pretende mostrar por separado el comportamiento de las redes ópticas subterráneas y aéreas. Finalmente, se ha descrito de forma sencilla el interesante mundo de las redes sónicas, sobre todo a los futuros operadores de estas redes como son nuestros estudiantes de hoy.

Referencias bibliográficas

1. Union International of Telecomunication. ITU-T G.698.1, Digital Systems and Networks. Transmission System and Media. (2012).
2. E Poutrina and J.P. Agrawal. Fellow. IEEE. Effects of Distributed Raman Amplification on Timing Jitter in Dispersion-Managed Lightwave Saysten, (2002).
3. D. Bimberg, M Grundmann. Quantum Dot Heteroestructures (Wiley, New York, (1999).
4. Ángel Ullán Nieto. Contribuciones basadas en la Dispersión Estimulada de Brillouin en Fibras Ópticas para Sensores Distribuidos y Láseres, (2013).
5. Luis Rojas, Jhon Matheus, Javier Marín, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Zulia (LUZ), Estudio del fenómeno de Dispersión por Modo de Polarización de Onda (PDM) en Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas. (2006).
6. Saavedra G, Dante Leonelli. Propagación de Pulsos Ópticos a través de Amplificadores de Fibra Dopada con Erbium, (EDFA), (2005).
7. Juan C Fernández. Departamento de Física, Universidad de Buenos Aires, Ecuaciones de Maxwell, (2004).
8. A. Cornejo, R. Díaz. The Walenght of a Láser Diode and the Birefrigence of Mica: The IphO40 experimental exam, (2010).
9. Dustin Symanski, Larry S Gullman. MSB Thechnology Corporation CA, Metod for Measuring Low Jitter Level in Digital-to- analog Converter, (2007).
10. Vicente Sagredo A. Dpto. de Física, Universidad de Los Andes (ULA), Estudios de Nano Partículas Magnéticas en Óxidos Semiconductores y Metálicos, (2013).

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Índice acumulado

Nº 1 Julio - Diciembre 2011

Algunas series e integrales con funciones trigonométricas
Some series and integrals with trigonometric functions
Alfredo Villalobos y Glenny García

Control mediante interconexión y asignación de amortiguamiento del sistema mecánico subactuado TORA
Interconection and damping assignment control of the subactuated TORA mechanical system
Atilio Morillo, Maribel Pérez Pirela, Miguel Ríos y Vivian Acosta

Algunos resultados que envuelven la función hipergeométrica de Wright y el cálculo fraccional
Some results involving fractional calculus and Wright's generalized hypergeometric function
Susana Salinas de Romero y Carlos Segundo Muñoz Valencia

Eficiencia del quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de baja turbidez asociadas a la producción de petróleo
Efficiency of chitosan as coagulant during treatment of low turbidity water associated crude oil production
Yaxcelys Caldera, Yim Rodríguez, Hernando Oñate, Jhosana Prato y Edixon Gutiérrez

Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones
Chitin and Chitosan friendly polymer. A review of their applications
Zulay Mármol, Gisela Páez, Marisela Rincón, Karelen Araujo, Cateryna Aiello, Cintia Chandler y Edixon Gutiérrez

Algunos resultados sobre la función de Bessel de dos indices y un parámetro
Some results on Bessel function of two indexes and one-parameter
Leda Galué y Greilyn Castillo

Generalización fraccional de la ecuación de Schrödinger relacionada a la Mecánica Cuántica
Fractional generalization of Schrödinger equation related to Quantum Mechanics
Shyam Kalla, Ram Kishore Saxena y Ravi Saxena

Nº 2 Enero - Junio 2012

Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización
Design of disinfection equipment for ultraviolet light to wastewater treatment with goals of reutilization
Mayra Sánchez, Nellimar Villalobos, Edixon Gutiérrez y Yaxcelys Caldera

Cinética de intercambio iónico bajo control mixto en medio lácteo
Ion exchange kinetics under mixed control in milk
Jorge Alaña, Karina Martínez, José González, Juan Hernández y Cézar García

Contenido de fracciones orgánicas en aguas de producción de petróleo
Organic fractions in water from crude oil production
Edixon Gutiérrez, Yaxcelys Caldera, Leopoldo Ruesga, Cristina Villegas, Roscio Gutiérrez, Ninoska Paz, Edith Blanco y Zulay Mármol

Solitones topológicos: Cúmulos de energía
Topological solitons: Lumps of energy
Ramón J. Cova

Ingeniería Química: Historia y Evolución
Chemical Engineering: History and Evolution
Cateryna Aiello Mazzarri, Zulay Mármol y Araceli Sánchez de Puertas

Comparación de las propiedades que influyen en la combustión entre el fly ash, carbón y diferentes derivados del petróleo
Comparison of the properties that influence in the combustion among the fly ash, coal and different derived of the petroleum
Analí Machado, Cezar García, Yolanda Rincón, Neyma García, José González y Juan Hernández

Nitrobacterias en reactores biológicos rotativos de contacto (RBC) de tres cámaras bajo diferentes cargas orgánicas
Nitrobacteria in three stages rotating biological contactor (RBC) reactors under different organic loads
Julio César Marín, Evelín Castro, Elisabeth Behling, Gilberto Colina, Laugeny Díaz y Nancy Rincón

Generalización de los polinomios de Bernoulli de índice arbitrario complejo
Generalization of Bernoulli polinomials of arbitrary complex index
Ana Isolina Prieto, Josefina Matera, Susana Salinas de Romero y Marleny Fuenmayor

Nº 3 Julio - Diciembre 2012

Criterios para la gestión de los sistemas de inventarios
Criteria for management inventories systems
Alfredo Leal y Karim Oliva

Contenidos curriculares y rendimiento académico de los estudiantes en la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia
Contents curriculares and academic performance of the students in the Faculty of Agronomy of the University of Zulia
Mary Isabel Urdaneta Portillo, Gladys Sarmiento, José Hernández y Jairo Fernández

Mínimos cuadrados parciales con el método de descenso de mayor pendiente
Partial least square with method of maximum gradient descent
Eddy Jackeline Rodríguez

Usabilidad de entornos virtuales 3D colaborativos en el proceso de enseñanza–aprendizaje
Usability of collaborative 3D virtual environments in the teaching-learning processes
Carlos Arrieta

Desinfección de aguas residuales de una industria avícola para su reutilización
Disinfection of poultry industry wastewater for reuse
Edixon Gutiérrez, Anna Travaglini, Giselle Uzcátegui y Yaxcelys Caldera

Estudio comparativo entre el método de Lemke y el método de los conjuntos activos para programación cuadrática
Comparative study between Lemke's method and the active set method for quadratic programming
Marihebert Leal, Kilkenis Fuenmayor, Javier Bastidas y Susana Salinas

Nº 4 Enero - Junio 2013

Comunidades de práctica en la investigación universitaria
Communities of practice in the university research
Sergio de Pool

Representación integral de la función de Bessel de dos índices y un parámetro
Integral representation of the Bessel function of two indexes and a parameter
Leda Galué y Greilyn Castillo

Algunas propiedades de las N – Normas
Some properties of N – Norms
José Sarabia

Biodegradación de queroseno por cultivos de bacterias aisladas de una fosa petrolera en Venezuela
Kerosene biodegradation by bacterial cultures isolated from oil pit in Venezuela
Laugeny Díaz, Beltrán Briceño, Mónica García, Néstor Rosales, Julio Marín, Cateryna Aiello y Ever Morales.

Factibilidad de inserción del Transmilenium como solución a la situación actual del sistema de transporte público de la ciudad de Maracaibo
Feasibility study of the Transmilenium like a solution to the actual public transport situation in the Maracaibo city
Angi Rojas y Marco Hinder

Modelado del secado en capa fina y del presecado al sol a diferentes alturas de la capa de la Lemna obscura del Lago de Maracaibo
Modeling of the thin layer drying and solar predrying at the different layer thicknesses of the Lemna obscure from Maracaibo Lake
Leobaldo Suárez, Alexis Faneite y Alexis Ferrer

Algunos resultados de la subordinación diferencial de Briot – Bouquet de funciones analíticas
Some results on Briot – Bouquet differential subordination of analytic functions
Alka Rao y Shyam Kalla

Nº 5 Julio - Diciembre 2013

Biblioteca de diferenciación automática para la maquina virtual de Java.
Automatic differentiation library for the Java virtual machine
María Portillo, Nelson Arape y Gerardo Pírela

Eficiencia de la semilla moringa oleífera como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de poca turbiedad
Efficiency of the moringa oleífera seeds as organic coagulant for metal removal in low turbidity wastewaters
Marielba Más y Rubí, Sedolfo Carrasquero, Daimarys Martínez, Donaldo Gabriel Mejías y Luis Vargas

Evaluación de la recuperación de Vanadio y Níquel por lixiviación acida de las cenizas volantes del aceite combustible
Evaluation of recovery of vanadium and nickel by acid leaching from oil fly ash
Cézar García, Roselis Rosales, Blanca Feijoo, Juan Hernández, José González y Gabriela Carruyo

Influencia de la relación de la geometría vertical en el comportamiento estructural de edificaciones aporticadas de concreto armado.
Influence of the aspect ratio of vertical geometry on the structural behavior of framed reinforced concrete buildings
Oswaldo Russian, Víctor Salazar y Gerardo Gutiérrez

Análisis numérico computacional de la distribución de temperaturas en una barra
Computational numerical analysis for the temperature distribution in bar
Alfredo Villalobos y Antonio Quintero

Validación de un método cromatográfico para la determinación de vitamina A en muestras de leche
Validation of a chromatographic method for the determination of vitamin A in milk samples
Karelen Araujo, Gisela Páez, Zulay Mármol, Elsy Arenas, Ana Cáceres y Cateryna Aiello Mazzarri

Nº 6 Enero - Junio 2014

Sobre una generalización de la función hipergeométrica de Gauss
On one generalization of the Gauss hypergeometric function
Nina Virchenko

Representación integral de las $e^{\alpha x}x^k y^l$ – funciones de onda
Integral representation of $e^{\alpha x}x^k y^l$ – wave functions
Iryna Alexsandrovich y Nina Virchenko

Algunos resultados sobre la funcion de Bessel de tres variables
Some results on the function of three variables Bessel
Ana Isolina Prieto, Josefina Matera, Leda Galué y Susana Salinas

Integrales y ecuación diferencial que involucran la función de Wright
Integrals and differential equation involving Wright functions
Susana Salinas de Romero, Daniel Meza y Marleny Fuenmayor

Sobre las desigualdades integrales fraccionarias y sus q-análogos.
On fractional integral inequalities and their q-analogues
Sunil Dutt Purohit, Faruk Ucar and R.K. Yadavc

Una nueva clase de polinomios q-Apostol-Bernoulli de orden α
A new class of q-Apostol-Bernoulli polynomials of order α
Mridula Garg and Subhash Alha

Algunos resultados que involucran operadores q-integrales fraccionales generalizados de Erdélyi-Kober
Some results involving generalized Erdélyi-Kober fractional q-integral operators
Leda Galué

Revisión de la teoría de Boehmians
Boehmians revisited
P. K. Banerji and Deshna Loonker

Algunas propiedades de las N-normas (II)
Some properties of N-norms (II)
José A. Sarabia R

Nº 7 Julio - Diciembre 2014

Fermentación en estado sólido: Una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de desechos agroindustriales
Solid state fermentation: A biotechnological alternative for exploitation of agroindustrial wastaes
José R. Ferrer G, José L. Machado, Jhanna Brieva

Propuesta de un sistema de seguridad residencial inalámbrico basado en instrumentación virtual
Proposal for a wireless home security system based on virtual instrumentation
Gereli de los Ángeles Gutiérrez Finol

Sistema de facturación vehicular en peajes basado en tecnología de identificación por radio frecuencia (RFID)
Vehicular toll collection system based on radio frequency identification technology (RFID)
Angel D. Larreal M., Georma P. Marachli M.

Determinación del grado de conversión global del jugo de piña en etanol por medio de la fermentación alcohólica
Determination of the conversion degree of pineapple juice through alcoholic fermentation
Briceida C. Fernández A., Maite V. Gómez S., José R. Ferrer G, Marisela Rincón

Modelo matemático para la evaluación de parámetros hidráulicos de un reactor anaerobio de flujo ascendente a escala piloto (RAFAep)
Mathematical model for evaluating parameters of a hydraulic upflow anaerobic reactor pilot scale (RAFAep)
Gabriel Arguello, Gerardo Aldana, Jhonny Perez

Dispersión gelatinosa de huesos bovinos para la clarificación de aguas con baja turbidez
Bovine bone gelatinous dispersion for clarification of water with turbidity low
Lorena Fuentes, Yolimar Aguilar, Yaxcelys Caldera, Iván Mendoza

Nanocompuestos basados en arcilla y mezclas heterogéneas de termoplásticos. Una revisión
Nanocomposites based on clay and heterogenous blends of thermoplastics. A review
Helen Inciarte, Haydée Oliva

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Normas para la presentación de artículos

1. La Revista Tecnocientífica URU es una revista digital arbitrada de la Universidad Rafael Urdaneta cuyo propósito es dar a conocer trabajos científicos originales e inéditos en las áreas de Ingeniería (Química, Civil, Eléctrica, Computación, Telecomunicaciones, Industrial y Producción Animal, entre otras), Enseñanza de la Ingeniería, Arquitectura y ciencias afines a las mismas.

2. Tipos de trabajos

Se aceptarán para la publicación artículos científicos inéditos, esto es, que no hayan sido enviados o publicados en otro órgano de divulgación científica con anterioridad, con un máximo de quince (15) páginas y escrito en MICROSOFT OFFICE WORD. Se deben consignar tres copias y un CD-ROM del artículo.

2.1 Artículos de actualización científica que resuman el "Estado del Arte" de las áreas de la revista, con un máximo de quince (15) páginas.

2.2 Artículos de reflexión sobre un tema especifico de las áreas de la revista, desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, recurriendo a fuentes originales.

2.3 Artículos de revisión: documentos donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones, publicadas o no, sobre una temática especializada de las áreas de la revista.

2.4 Artículos de discusión: documentos que presentan el debate de afirmaciones realizadas en artículos anteriores.

2.5 Artículos de invitados especiales con un máximo de quince (15) páginas.

2.6 Notas técnicas: sobre mejoras de procesos en ingeniería, resultados de investigaciones derivadas del ejercicio profesional en ingeniería y ciencias afines, con un máximo de ocho (8) páginas.

2.7 Reseña de libros.

2.8 Cartas al Editor (a).

3. La portada debe contener

3.1 Titulo del trabajo en español e inglés en letras mayúsculas y minúsculas.

3.2 Nombre(s) del autor(es) y su dirección institucional(es) completa(as) (dirección postal, correo electrónico).

3.3 Resumen del trabajo en español e ingles (abstrac) con un máximo de doscientas (200) palabras.

3.4 Palabras clave en español e inglés (key words) con un máximo de cinco (05) palabras.

4. Normas de estilo

4.1 El orden a seguir para el artículo es: portada, resumen (en español e inglés), introducción, fundamentos teóricos, parte experimental, resultados, discusión de resultados, conclusiones, agradecimiento y referencias bibliográficas.

4.2 El artículo debe escribirse en estilo Times New Roman tamaño 12, el título tamaño 16 y las figuras, tablas y textos subordinados tamaño 10.

4.3 El interlineado debe ser a doble espacio a excepción del resumen, agradecimiento y referencias bibliográficas que van a un espacio.

4.4 El nombre de cada sección se escribirá en negritas. Estos deberán estar centrados.

4.5 El nombre de las subsecciones se escribirá en negritas a la izquierda del texto y en mayúsculas y minúsculas.

4.6 Las figuras, fotografías, diagramas y gráficos deben denominarse como figuras y éstas deben ir numeradas con números arábigos, así como las tablas. Además, deben incluirse dentro del texto correspondiente y con su respectiva leyenda.

4.7 La redacción de los trabajos puede ser en español o inglés.

4.8 Las fotografías, imágenes, mapas y figuras incluidas en el documento se anexarán también por separado en el CD-ROM con excelente calidad.

4.9 Las fotografías deben estar en blanco y negro, bien contrastadas y brillantes de un ancho máximo de 9,5cm.

4.10 Todos los símbolos matemáticos deben ser escritos en forma clara y legible, con los subíndices y superíndices ubicados correctamente.

4.11 Deben ser numeradas todas las ecuaciones matemáticas en forma consecutiva con números arábigos entre paréntesis y ubicados en el margen derecho.

4.12 Las citas dentro del documento se escriben con el nombre de sus autores seguido con un número entre corchetes que corresponde a la referencia.
Ejemplos: García [1], L Moreno [3, Pág. 19-24] o ubicando el número de la referencia sin colocar autor [4], si son 3 o más autores se escribe K. Nishimoto et al. [2].

4.13 Las referencias bibliográficas de artículos de revistas deben contener autor(es) si tiene varios autores separarlos con comas, título de la revista, volumen y número, año de publicación (entre paréntesis) y páginas. Sólo deben incluirse referencias bibliográficas con autores totalmente identificados y se escribirán por orden de aparición de las citas.
Ejemplo: García C., Marín J., Alaña J., Martínez K. y Faría J., Modelo de Nernst-Planck aplicado a la cinética de Intercambio Iónico del siatema PO4 (-3)- Cl(-1) en leche, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, Vol. 30, Nº. 3, (2007), 236-243.
Los libros se escriben: apellido e inicial del autor(es) con mayúsculas y minúsculas.
Ejemplo: Nishimoto K. (Editor), Fractional Calculus and its Applications, Nihon University, Tokyo (1990).

4.14 En los articulos deben emplearse unidades del Sistema Internacional: metro (m), kilogramos (Kg), Segundo (s), entre otras.

5. Arbitraje

5.1 El trabajo, recibido por el Editor(a), será enviado al Comité Editorial para su revisión y consideración de tres árbitros.

5.2 El método de arbitraje que sigue la revista es de tipo “doble ciego”, que consiste en que tanto los árbitros como los autores desconocen sus respectivas identidades.

5.3 Los trabajos serán evaluados de acuerdo a los siguientes criterios: claridad, originalidad del contenido, aportes al campo de conocimiento, coherencia del discurso, adecuada organización interna, calidad de las referencias bibliográficas, adecuada elaboración del resumen y pertinencia del título.

5.4 En caso de recibir observaciones por parte de los árbitros, estas serán enviadas al(los) autor(es) para su corrección. Después de realizar las correcciones, los autores devolverán la versión corregida en un CD-ROM, así como un original impreso y tres copias.

5.5 Las pruebas de imprentan serán enviadas a los autores para la revisión final del artículo.

5.6 Cuando el trabajo sea aceptado los autores serán informados del tiempo aproximado de publicación. Si el trabajo es rechazado los autores podrán remitir al Editor(a) Jefe una comunicación exponiendo argumentos a favor de su artículo. El Comité Editorial considerará las acciones a tomar.

5.7 Cada autor principal de los artículos publicados recibirá gratuitamente una (1) revista y cinco (5) separatas.

6. Consideraciones finales

6.1 Los conceptos u opiniones emitidos en los artículos, serán de exclusiva responsabilidad de los autores.

6.2 El Comité Editorial se reserva el derecho de los arreglos de estilo que considere conveniente.

6.3 Bajo ninguna circunstancia, la revista devolverá los originales (Impreso y CD-ROM) de los artículos enviados para su consideración.

6.4 Lo no previsto en las presentes normas será resuelto por el Comité Editorial.

Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Nº 8 Enero - Junio 2015
Depósito legal: ppi 201402ZU4464
ISSN: 2343 - 6360

Guidelines for Submitting Articles

1. URU techno-scientific journal is an arbitrated digital journal of the Rafael Urdaneta University, whose purpose is to publish scientific papers in the areas of engineering (Chemical, Civil, Electrical, Computer, Telecommunications, Industrial, Animal Production, etc.).

2. Types of articles

Articles will be accepted for publication which come from undergraduate research and have not been submitted or published in other scientific journals, and should have a maximum of fifteen (15) pages, and written in MICROSOFT OFFICE WORD. Three copies should be submitted along with a CD-ROM containing the article.

2.1 Scientific articles that summarize the "state of the art " in areas of interest for the journal with a maximum of fifteen (15) pages.

2.2 Reflection articles on specific issues covered by the journal, from an analytical, interpretative or critical viewpoint of the author, and based on original sources.

2.3 Review articles which analyze, systematize and integrate results, published or unpublished, on specific issues covered by the journal.

2.4 Discussion articles: A document that presents the debate of assertions published in previous articles.

2.5 Articles by special guests with a maximum of fifteen (15) pages long.

2.6 Technical notes on process improvements in engineering, results of research obtained from professional practice in engineering and related fields, with a maximum of eight (8) pages.

3. The front page must contain

3.1 Title of paper in English and Spanish, in uppercase and lowercase letters.

3.2 Author's name, maximum of 6 authors and full institutional address or addresses (postal address, e-mail).

3.3 Abstract in Spanish and English with a maximum of two hundred (200) words.

3.4 Key words in Spanish and English with a maximum of five (5) words.

4. Text guidelines

4.1 The sequence for the article should be as follows: title, abstract (in English and Spanish), introduction, theoretical foundations, experimental part, and discussion of results, conclusions, acknowledgements and references.

4.2 Article should be written in 12 point Times New Roman, and 16 point for the title, and figures, tables and subordinate text should use 10 point. Interlining should be double space; abstract, acknowledgments and references should be single space.

4.3 The heading of each section should be centered and written in boldface letters.

4.4 Subsections headings should be written in boldface letters on the left of text and in upper and lower case letters.

4.5 Figures, photographs, diagrams and charts should be labeled as figures, and numbered with Arabic numerals, as well as tables. They should be included within the corresponding text along any explanation.

4.6 The article draft should be in Spanish or English.

4.7 Photographs, images and figures included in the document should be annexed separately on a CD-ROM of excellent quality.

4.8 Photographs must be in black and white, with good contrast and brightness, with a maximum width of 9.5 centimeters.

4.9 Mathematical symbols should be written clearly and legibly, with subscripts and superscripts correctly located.

4.10 Mathematical equations should be numbered sequentially with Arabic numerals within parentheses and placed on the right margin.

4.11 Quotations within the document should be written with the author's name followed with a number inside brackets that corresponds to the reference. Examples: García [1], L. Moreno [3, pages 19-24] or, if there are three or more authors, the reference number without the author's name [4], and written as K.Nishimoto et al. [2].

4.12 Bibliographic references to journal articles should include author (s) name (s); if it has multiple authors, their names should be separated by commas, title of journal, volume and number, year of publication (in parentheses) and page numbers. Bibliographical references should be included only when authors are fully identified and they will be written in order of appearance of the quote. Example: Garcia C., Marin J., Alaña J., Martinez K y Faria J., Model of Nernst-Planck applied to the ion exchange kinetics of the PO4 (-3)-Cl(1) system in milk, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, vol. 30, Nº 3, (2007), 236-243.

Books references should be written: surname and initial of the author (s) name (s) in uppercase and lowercase letters.

Example: Nishimoto K. (editor), Fractional calculus and its applications, Nihon University, Tokyo (1990).

4.13 Articles should use the International System Units: meter (m), kilogram (kg), second (s).

Evaluation

5.1 Articles received by the Editor (s) will be submitted to the Editorial Committee for review and consideration of three arbitrators.

5.2 The evaluation method followed by the Journal is of the "double blindness" type; neither the arbitrators nor the authors know their respective identities.

5.3 The works submitted will be evaluated according to the following criteria: clarity of language, originality of contents, contributions to the field of knowledge, coherence, adequate internal organization and quality of bibliographic references, appropriate elaboration of the abstract and relevance of title.

5.4 In case of observations from the referees, these will be forwarded to the author (s) for corrections. After making corrections, the authors should return the corrected version on a CD-ROM, as well as an original of the reviewed work and three copies.

5.5 Press proof will be sent to authors for final review of the article.

5.6 When the work is accepted, authors will be informed of the approximate date of publication. If the work is rejected, the author may submit a communication to the Editor in Chief presenting his arguments in favor of the article. The Editorial Committee will consider the actions to take.

5.7 Each author will receive one (1) free copy of the journal volume and 5 reprints.

Final considerations

6.1 Concepts or opinions expressed in articles shall be the sole responsibility of the authors.

6.2 The Editorial Committee reserves the right for any format changes that considers convenient.

6.3 Under no circumstances, the magazine will return the original of the articles (print and CD-ROM) submitted for consideration.

6.4 Questions not answered by these guidelines shall be resolved by the Editorial Committee.

Revista Tecnocientífica URU **N° 8**
Maracaibo, Venezuela
Diseño: Impresos Grafifor, C.A.