

Enero – abril 2016, Vol 23 N° 1 ISSN 1316–6832



Revista INGENIERÍA UC

Órgano de Divulgación
Científica y Tecnológica de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo

Disponible en:
Revista Ingeniería UC
www.ing.uc.edu.ve/revistaing
revista.ing.uc.edu.ve

VALENCIA – VENEZUELA

Universidad de Carabobo Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. José Luis Nazar

Decano

Prof. Silvia Sira
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof. Olga Martínez
Asistente al Decano

Prof. Lisbeth Manganiello
Directora de Investigación

Prof. Carlos Jiménez
Director Esc, Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos
Estudiantiles

Prof. Demetrio Rey Lago
Director de Postgrado

Prof. José G Velasquez
Director Esc. Ing, Mecánica

Prof. María Teresa Cruz
Directora Docencia y Currículo

Prof. Cristóbal E, Vega González
Director del Instituto de
Matemáticas y Cálculo Aplicado

Prof. Francisco Soto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos
Profesores

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de
Investigaciones Químicas

Prof. Carlos Romero
Director Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Mejías
Director Esc. Ing Telecomunicaciones

Prof. Nelson Hernández
Director Consejo Facultad

Prof. César Seijas
Director del Centro de
Procesamiento de imágenes

Prof. Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof. Enrique Flores
Director de Extensión

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Se publica cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC). Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <http://revista.ing.uc.edu.ve/>

ISSN 1316-6832
Depósito legal pp 92.0200

Revista Ingeniería UC

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (United Kingdom UK);
LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia-Venezuela

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Valencia, Venezuela

Comité Editorial

Dr. Adelmo Ortiz Conde
USB, Venezuela
Dr. Ángel Rios Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Enrique Barbien
University of Houston, USA
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Herbert J. Sira R.
CINVESTAV-IPN, México
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela

Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Merlin Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Roberto Callarotti
IVIC, Venezuela
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz
Universidad de Florida, USA

Editores Honorarios

Dr. Edilberto Guevara
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Francisco Arteaga
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Asesores a la Editora Jefe:

Dr. Cristóbal E. Vega G.
IMYCA, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo

Ing. Jesús Jiménez, MSc.,
CATS, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo

Comité Técnico*

Dr. Eliecer Colina, ULA
Dr. Francisco García Sánchez, USB
Dr. Gian Franco Passariello, USB
Dr. Giovanni De Mercato, USB
Dr. Luis Vallés, UC
Dr. Alfredo Varela, UC
Dr. Sergio Pérez, UC
Dr. Antonio Bonsjak, UC
Dra. Susana Salinas de Romero, LUZ
Ing. Donato Romanello, MSc, UC
Ing. Thalia San Antonio, MSc, UC
Dra. Nereida Sánchez, UC
Ing. Lucila Martino, UC
Ing. Ricardo Villegas, MSc, UC

Ing. Paulino Del Pino, MSc, UC
Ing. Carlos Lameda, MSc, UNEXPO
Ing. Alfonso Alfonsi, UDO
Ing. Ángel Vellegas, UC
Dr. Demetrio Rey Lago, UC
Dr. Alfonso Zozaya, UC
Dr. José A. Díaz, UC
Dr. Guillermo Montilla, UC
Dra. Laura Sáenz, UC
Lic. Atilio Morillo, MSc, UC
Ing. Sergio Vellazana, MSc, UC
Lic. Reina Windevoxhel, MSc, UC
Ing. Enrique Pérez, UC
Ing. María T. Cruz, UC

Dr. Cesar Seijas F, UC
Dr. Fernando Mora, USB
Dr. Enrique Cázarez Rivera, ITESM, México
Dra. Yadira Martínez, UC
Ing. Luis Llave, UC
Ing. Johel Rodríguez, MSc, UPV, España
Lic. Celeste Fernández, MSc, UC
Ing. José R. Pacheco, UC
Dr. Cristóbal E. Vega González, UC
Ing. Teddy Rojas, MSc, UC
Ing. Carlos Jiménez, MSc, UC
Dr. Luis Melián, UC
Ing. Antonio Millán, MSc, UC
Ing. Jesús Jiménez, MSc, UC

Ing. Wilmer Sanz, MSc, UC
Ing. Carlos Hernández, MSc, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Dra. Damelys Zabala, UC
Ing. Jennifer Aparicio, UC
Dra. Lilly Marcano, UC
Ing. César Martínez, UC
Ing. Alejandro Centeno, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Ing. Franklin Camejo, UC
Ing. Vanesa Altomares, UC
Dra. Sandra Cabello, UC
Ing. Julio Pineda, UC

* Lista parcial

Frecuencia de publicación

Revista INGENIERÍA UC se publica un volumen anual en tres números: abril, agosto y diciembre

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

<http://revista.ing.uc.edu.ve/>

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Diseño y Diagramación: Revista INGENIERÍA UC, Dirección de Investigación - IMYCA (C. Vega) - CATS (J. Jiménez) en L^AT_EX, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela



Revista INGENIERÍA UC
VALENCIA - VENEZUELA

ISSN 1316–6832



Revista INGENIERÍA UC

ORGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela



Contenido General, (*General content*)

v Editorial

J.–L. Nazar, L. Manganiello

1 *Invited Article: Design and development of some functions to estimate the counting processes on the survival analysis*

Diseño y desarrollo de algunas funciones para estimar los procesos de conteo en el análisis de supervivencia

Carlos Martínez

8 *Development of a software to obtain a system of linear equations from a vectorized fluid network*

Desarrollo de un software para la obtención del sistema de ecuaciones lineales de una red de fluido vectorizada

A. Bolívar, A. Almarza

22 *Vacuum bag in vacuum chamber technique for epoxy matrix composite materials fabrication*

La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi

J. Arruti R.

30 *Analysis of manufacturing system containing a mutual exclusion in the context of Petri net theory*

Análisis de sistemas de manufactura conteniendo una exclusión mutua usando redes de Petri

Mata Guelvis, Méndez Arnaldo, Cardillo Juan, Chacón Edgar

41 *Influence of the test parameters of sliding friction of a austenitic - ferritic stainless steel using methodologies Taguchi and Anova*

Influencia de los parámetros del ensayo de fricción por deslizamiento de un acero inoxidable austenítico–ferrítico usando las metodologías de Taguchi y Anova

J. E. Romero C.

49 *Unconventional methods for fault diagnosis in distribution transformers*

Métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en transformadores de distribución

María Gabriela Mago, Luis Vallés, Jhon Jairo Olaya, Nestor Escudero

58 *Design of a biomechanics prosthesis for child*

Diseño de una prótesis biomecánica para niños

Brizeida Gámez, Carlos Flores, Franklin Cabrera, Javier Cabrera

67 *Operating parameters more appropriate in the process of roasted cocoa almonds*

Parámetros de operación más adecuados para el proceso de tostado de almendras de cacao

R. Calderón, Y. Chaurán, N. Mendoza, C. Vega, J. Rojas, L. Manganiello

Contenido General (Continuación), (*General content*)

81 *Meta-optimization of harmony search*

Meta-optimización de la búsqueda armónica

Alejandro Centeno, Cristóbal Vega, Demetrio Rey-Lago

90 *Seismic testing of intelligent buildings to measure lateral displacement (Portico Structures)*

Instrumentación sísmica de edificios inteligentes para la medición de desplazamientos laterales (Estructuras Aporticadas)

Marlyn S. Silva O., Francisco Soto

(b) **Información General**

(b)1 **Normas para la presentación de artículos**

(b)4 **Authors Information**

(b)6 **Carta de compromiso**

(b)4 **Índices de Revista Ingeniería UC**

(b)4 **Comité editorial**

Editorial

La Revista Ingeniería UC, en su número uno (1) correspondiente al lapso enero – abril del año 2016, se enorgullece en notificar a todos sus lectores que ya se encuentra indexada en **Emerging Sources Citation Index – Thomson Reuters, ESCI**. Thomson Reuters crea un nuevo producto en Noviembre de 2015, ESCI, es una base de datos dónde están todas las revistas que en la práctica están siendo evaluadas para entrar a formar parte de las bases de datos de Web of Science Core Collections (Science Citation Index, Social Science Citation Index y Arts & Humanities Citation Index). Por lo tanto este nuevo índice consiste en el uso público de la base de datos que utilizan los analistas de Web of Science para realizar el seguimiento de aquellas revistas que optaran a entrar en los productos de evaluación de revistas más exigentes (Core Collections). Esto añade transparencia al proceso y hace públicas las métricas de estas revistas. Este hecho convierte a Thomson Reuters como el producto de evaluación de revistas con un mayor número de títulos¹. Nuestro país tiene quince (15) Revistas seleccionadas, encontrándose entre estas, nuestra Revista Ingeniería UC, demostrando de esta manera, que todo trabajo realizado, con mística, dedicación y espero siempre brilla con luz propia a pesar de las adversidades.

Abrimos esta edición con el artículo invitado de Martínez sobre análisis de supervivencia, el objetivo de esta contribución consistió en el desarrollo de rutinas de “lenguaje R” para estimar procesos de conteo, los resultados se comparan con otros obtenidos mediante otro paquete de lenguaje similar. Bolívar y Almarza presentan un software que forma automáticamente el sistema de ecuaciones inicial, conformado por aquellas ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos, permitiendo al usuario suministrar las características del fluido y de las tuberías. La red suministrada puede ser modificada en el dibujo y el programa calcula la nueva distribución del caudal. Arruti en su trabajo propone la técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío (BVCV) para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi con bajos contenidos de porosidades como alternativa a la técnica tradicional de bolsa de vacío (BV). Entre sus principales logros se observó que la superficie de las láminas fabricadas con BVCV tiene un acabado de calidad superior a las obtenidas mediante BV.

Mata y colaboradores exponen la terminología necesaria en un contexto de manufactura para establecer las técnicas de análisis más novedosas de los sistemas de eventos discretos conteniendo una exclusión mutua, dado que se debe construir una red de petri, cuya estructura y marcación inicial garanticen acotamiento, no bloqueo y reiniciabilidad. Romero nos brinda un estudio sobre la influencia de los parámetros de un tribómetro, tales como carga normal, velocidad de desplazamiento, ensayos de fricción entre otros. De todos los parámetros evaluados, la distancia de deslizamiento resultó ser el parámetro más influyente para la fricción por desplazamiento en seco del acero inoxidable austenítico – ferrítico estudiado. Mago y colaboradores realizan el diagnóstico de fallas de los equipos que forman parte de las redes de distribución entre los cuales se encuentran los transformadores monofásicos de poste, a través de métodos especiales. El soporte de datos fue suministrado por Corpoelec (Valencia – Venezuela) y Codensa (Bogotá – Colombia).

¹<https://ec3metrics.com/emerging-source-citation-index-las-revistas-cientificas-en-estado-de-emergencia/>

Gámez y colaboradores nos presentan el diseño de una prótesis de mano biomecánica (mano derecha), cuyas dimensiones y peso permite ser adaptada a niños mayores de ocho (8) años y adolescentes. Los resultados obtenidos reportan un dispositivo protésico que puede funcionar sin inconvenientes bajo condiciones normales de operación y permite múltiples funciones de prensión. Calderón, Chauran y colaboradores nos presentan la Tesis Mención publicación de la Escuela de Ingeniería Química, bajo la dirección de su Tutora, Profesora Manganiello, donde realizan un interesante estudio que pone de manifiesto la optimización de parámetros de operación más adecuados para el proceso de tostado de la almendra del cacao, esta etapa es decisiva para la conservación del mayor porcentaje de polifenoles totales. Los polifenoles son sustancias de alto valor nutricional a las cuales se les atribuyen la prevención de muchas enfermedades, entre ellas el cáncer. Centeno, Vega y Rey-Lago en su trabajo nos exponen la implementación de una propuesta que permite realizar en un instante óptimo de los parámetros del algoritmo de búsqueda armónico (ABA), conjuntamente con la generación de información sobre su comportamiento.

Finalmente cerramos esta edición con un importante aporte en el ámbito de la Ingeniería Civil de Silva y Soto, en su trabajo los autores presentan la descripción de un sistema que permite la instrumentación de edificios regulares constituidos por pórticos de concreto armado para la medición de sus desplazamientos laterales bajo efecto de cargas sísmicas. A partir del sistema descrito se realiza una generalización de los resultados para ofrecer una metodología para la instrumentación sísmica de edificios como aporte a la normativa venezolana.

Como siempre nos despedimos, invitando muy cordialmente a publicar en nuestra Revista INGENIERÍA UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería, ciencias afines y ahora con una nueva indexación en **Emerging Sources Citation Index – Thomson Reuters, ESCI, que nos permitirá mayor visibilidad mundial a todos los trabajos que aquí se publiquen.**

Profesor *José Luís Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesora *Lisbeth Manganiello, PhD*
Editora – Jefe

Invited Article:

Design and development of some functions to estimate the counting processes on the survival analysis.

Martínez Carlos*

Departamento de Investigación Operativa, Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

Survival analysis is a field of statistics with available tools to estimate, model and analyze the times of occurrences of events. This area of statistics is widely used in medical and engineering research, such as studies of reliability of machines and equipment. Counting processes are widely used to estimate survival functions, and non-recurring events. Counting processes for recurrent events are discussed in this research. This article provides computational tools that facilitate the calculation of counting processes in this analysis. The main objective of this work is the development of some routines “R-language” to estimate these processes count. For the development of this work packages available language used in the Internet network; such as “survival”, “survrec” and “TestSurvRec”. Some illustrative examples and calculations of counting processes for the survival analysis are showed and compared with the results obtained with the other package R-language.

Keywords: counting processes; survival analysis; recurrent events; R-language.

Diseño y desarrollo de algunas funciones para estimar los procesos de conteo en el análisis de supervivencia.

Resumen.-

El análisis de supervivencia es un campo de la estadística que dispone de herramientas para estimar, modelar y analizar los tiempos de ocurrencias de eventos. Esta área de la estadística es ampliamente utilizada en investigaciones médicas y de ingeniería, como por ejemplo los estudios de confiabilidad de maquinas y equipos. Los procesos de conteo son muy utilizados para estimar las funciones de supervivencia, con y sin eventos recurrentes. Los procesos de conteo para eventos recurrentes se discuten en esta investigación. Este artículo proporciona herramientas computacionales que facilitan el cálculo de los procesos de conteo en dicho análisis. El objetivo central de este trabajo es el desarrollo de algunas rutinas del “lenguaje R” para estimar estos procesos de conteo. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron paquetes del lenguaje disponibles en la red de internet; como por ejemplo, “survival”, “survrec” y “TestSurvRec”. Algunos ejemplos ilustrativos y los cálculos de los procesos de conteo para el análisis de supervivencia se muestran y se comparan con los resultados obtenidos con el otro paquete del lenguaje R.

Palabras clave: procesos de conteo; análisis de supervivencia; eventos recurrentes; lenguaje R.

1. Introduction

Fleming & Harrington [1] and Andersen & Gill [2] introduced details of the approach of the counting processes to classical survival analysis.

*Autor para correspondencia

Correo-e: cmmm7031@gmail.com (Martínez Carlos)

Aalen [3] pioneer of this technical introduced a martingale approach to survival analysis, where statistical methods can be cast within a unifying counting processes framework. These processes are referred to a single event for recurrent events the authors were use processes double indexed. Wang-Chang (WC) [4] and Peña et al. [5] developed proposals for survival analysis based on counting processes. WC proposed an estimator for the survival function for the case where there is a correlation between the times of occurrence. Peña, Strawderman and Hollander (PSH) developed a nonparametric estimator, that generalize the product limit estimator (or model GPLLE denoted so for its initials in English), for the case with recurrent events. See [6] and [7].

2. Framework

The present review article adopts a basic framework of the counting processes. The adoption of the framework of the counting processes introduced by Aalen [3]. We introduce some basic of counting processes.

2.1. The counting processes

A counting process is a stochastic process $\{N(t), t \geq 0\}$ with values that are positive, integer, and increasing. If $s < t$, then $N(t) - N(s)$ is the number of events occurred during the interval $[s, t]$. The counting processes for the i th subject was represented for $N_i(t)$ and $Y_i(t)$ with $t > 0$ and where, $N_i(t) = I\{X_i \leq t; \delta = 1\}$ and $Y_i(t) = I\{X_i \geq t\}$. $N(t)$ is referred as the number of event observed up to and including time t and $Y(t)$ is referred to as at risk process, indicating whether the subject is at risk at time t . Examples of counting processes include Poisson processes and Renewal processes. A counting process is increasing and hence, it is associated with a sub martingale. So, it can be written as: $N(t) = M(t) + A(t)$, with a martingale $M(t)$ and a predictable increasing process $A(t)$. $M(t)$ is called the martingale associated with the counting process $N(t)$ and the predictable process $A(t)$ is called the cumulative intensity of the counting process $N(t)$.

2.2. Wang-Chang estimator (1999)

Wang & Chang [4] developed a nonparametric estimator of the survival function for recurrent events. These authors propose an estimator for marginal survival function in case where there is correlation between the times of occurrences. The estimator can be defined using two processes, d^* and R^* . So,

$$\widehat{S}(t) = \prod_{i=1}^n \prod_{\{j: T_{ij} \leq t\}} \left[1 - \frac{d^*(T_{ij})}{R^*(T_{ij})} \right] \quad (1)$$

where, $S(t)$ is the survival function, i is the index for an individual or subject, j represents the index for an event, T_{ij} is the time from the $j - 1$ th to the j th event for subject i , τ_i is the time between the initial event and the end of follow-up for subject i , C_i the censoring time. $d^*(t)$ is the summation of the weighted average of the total number of observed uncensored recurrent times for a subject that are equal to t . $d^*(t)$ represents the sum of the proportion of individuals of times that are equal at inter occurrence when at least an event. $d^*(t)$ is evaluated at time t as,

$$d^*(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{I\{K_i > 0\}}{K_i^*} \sum_{j=1}^{K_i} I\{T_{ij} = t\} \right\} \quad (2)$$

$K_i^*(t)$ is the number of uncensored recurrent events for unit i , and K_i is the number of recurrent events for subject i . The function $\{.\}$ is one if the condition on breakers is true and zero on other case. So, let

$$K_i^* = \begin{cases} 1 & \text{if } K_i = 0 \\ K_i & \text{if } K_i > 0 \end{cases} \quad (3)$$

R_i^* is the summation of the weighted average of the total number of observed uncensored recurrent times for a subject that are greater than or equal to t . R_i is the total mass of the risk set at time t and it is calculated as,

$$R^*(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{K_i^*} \left[\sum_{j=1}^{K_i} I\{T_{ij} \geq t\} + I\{\tau_i - S_{ik_i} \geq t\} I\{K_i = 0\} \right] \right\} \quad (4)$$

2.3. PSH estimator (2001)

Peña et al. [5] developed a non-parametric estimator of the survival function to estimate the survival function of recurrent events. The nonparametric estimator of the inter-event time survivor functions under the assumption of a renewal. They consider a structure model which gap-times independent and identical distribution (i.i.d.). The author used two counting processes N and Y . they considered two time scales: one related to calendar time (s) and other related to gap time (t). So,

$$S(s, t) = \prod_{w \leq t} \left[1 - \frac{\Delta N(s, w)}{Y(s, w)} \right] \quad (5)$$

where, $S(t, s)$ is the estimator of survival analysis, $N(s, w)$ is one counting process and represents the number of observed events in the calendar period $[0, s]$ with $t \leq w$. It is calculated as,

$$N(s, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{K_i(s)} I\{T_{ij} \leq t\} \quad (6)$$

And,

$$K_i(s) = \sum_{i=1}^n I\{T_{ij} \leq s\} \quad (7)$$

The function $\{.\}$ is one if the condition on breakers is true and zero in other case. $Y(s, w)$ is other counting processes and represents the number of observed events in the period $[0, s]$ with $t \geq w$. So,

$$Y(s, t) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{K_i(s-)} I\{T_{ij} \geq t\} + I\{\min(s, \tau_i) - S_{iK_i(s-)} \geq t\} \right] \quad (8)$$

3. Proposals

We designed two functions in R language. We designed “Counting.Processes.WC” and “Counting.Processes.PSH” function to calculate of the counting processes of WC and PSH. With the help of the functions, the users can be able of to plot

the occurrences of an event for number of wished units. The user can change the total units to plot. We do not show the routines of these functions on this work. However, they can be solicited way e-mail of the author. The author included these functions on library of a new version of *TestSurvRec* package of *R – CRAN*.

3.1. Counting.Processes.WC function

This function permits estimates the counting processes of WC estimator and permits to plot the occurrences of events for a number wished of study units.

The syntaxes of this function is,

```
Counting.Processes.WC<-function(yy, dat="Data", xy = 1, xf = 1,
colevent="blue", colcensor="red", ltyx = 1, lwdx = 1, S = 1, T=1)
```

The arguments are details as follow, `yy <- dataset`, `dat <- name of dataset`, `xy <- Initial number of the unit of the dataset that is wish include on the study. For defect is “1”`, `xf <- Final number of the unit of the dataset that is wish include on the study. For defect is “1”`, `colevent <- colour wished for represent event line on the plot. For defect is “blue”`, `colcensor <- colour wished for represent censor line on the plot. For defect is “red”`, `ltyx <- Refer to the type of line that user wish represent the event. For defect is “1”`. `lwyx <- Refer to the type of line that user wish represent the censor. For defect is “1”`, `S <- Calendar time for the study. For defect is “1”` and `T <- Gap time for the study. For defect is “1”`.

3.2. Counting.Processes.PSH function

This function permits estimates the counting processes of PSH estimator and permits to plot the occurrences of events for a number wished of study units. The syntaxes of this function is,

```
Counting.Processes.PSH<-function(yy, dat = "Data", xy = 1, xf = 1,
colevent="blue", colcensor="red", ltyx = 1, lwdx = 1, S = 1, T=1)
```

The arguments are details as follow, `yy <- dataset`, `dat <- name of dataset`, `xy <- Initial number of the unit of the dataset that is wish include on the study. For defect is “1”`, `xf <- Final number of the unit of the dataset that is wish include on the study. For defect is “1”`, `colevent <- Colour wished for represent the event line on`

the plot. For defect is “blue”, `colcensor<- Colour` wished for represent the censor line on the plot. For defect is “red”, `ltyx<-` Refer to the type of line that user wish represent the event. For defect is “1”, `lwyx<-` Refer to the type of line that user wish represent the censor. For defect is “1”, `S<-` Calendar time for the study. For defect is “1” and `T<-` Gap time for the study. For defect is “1”.

4. Applications

4.1. Illustration of calculate of the counting processes of WC estimator

Example N° 1. For this example, we will use TBCplapy dataset of the TestSurvRec package [8]. On the procedure, we estimate the counting processes of WC estimator for the patient with *id* 72. Figure 1 shows occurrence times of tumours (weeks) on the unit number 72. The figure shows the calendar times of apparitions of the tumours on the patient with *id* 72: $S_{i=72,j=1} = 8$, $S_{i=72,j=2} = 15$, $S_{i=72,j=3} = 18$, $S_{i=72,j=4} = 20$, $S_{i=72,j=5} = 22$, $S_{i=72,j=6} = 25$, $S_{i=72,j=7} = 38$, $S_{i=72,j=8} = 40$ and $S_{i=72} = 48$. The last observation is the time of study of the patient. Its deduced that, $t_{i=72,j=1} = 8$, $t_{i=72,j=2} = 7$, $t_{i=72,j=3} = 3$, $t_{i=72,j=4} = 2$, $t_{i=72,j=5} = 2$, $t_{i=72,j=6} = 3$, $t_{i=72,j=7} = 13$, $t_{i=72,j=8} = 2$ and $C_{i=72} = 8$. We shows as calculates the counting processes for the WC estimator,

Estimation of $d_{i=72}^(t = 3)$.* Calculation of $d_{i=72}^*(t = 3)$ with $S = 42$,

$$d_{i=72}^*(t = 3) = \frac{I\{K_{i=72} > 0\}}{K_{i=72}^*} \sum_{j=1}^{K_{i=72}} I\{T_{i=72,j} = 3\}$$

Numbers of apparitions of the tumour on the unit with *id* = 72. $K_{i=72}^* = 8$, (see Figure 1).

As, $I\{.\}$ is one if the condition is true and zero in other case, as $K_i \geq 0$ is true, then $I\{K_{i=72}^* > 0\} = 1$, so,

$$\sum_{j=1}^8 I\{T_{i=72,j} = 3\} = 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0$$

$$\sum_{j=1}^8 I\{T_{i=72,j} = 3\} = 2$$

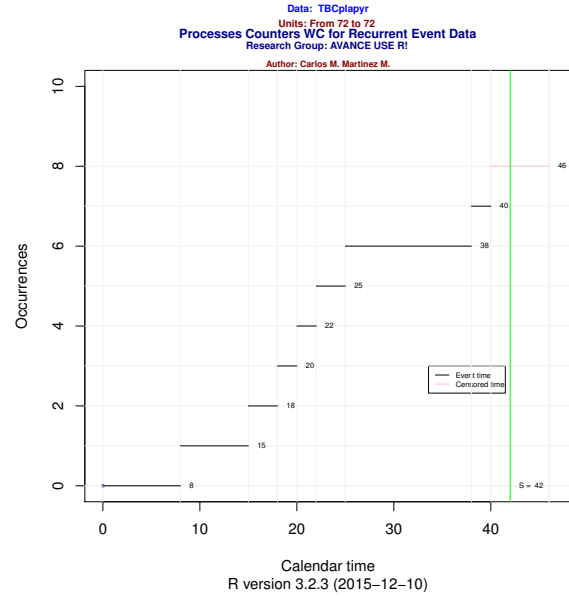


Figure 1: Graphics representation of the occurrence times of tumours on unit number 72.

See that, there is only one time of occurrence with $T = 3$ on the unit with *id* = 72, then,

$$d_{i=72}^*(T = 3) = 1/8 * 2$$

$$d_{i=72}^*(T = 3) = 0,25$$

For the estimation of $R_{i=72}^*(t = 3)$ is used the equation (4). So, for $i=72$,

$$\sum_{j=1}^8 I\{T_{i=72,j} \geq 3\} = 5,$$

$$\{K_{i=72}^* = 0\} = 0,$$

$$I\{S - S_{i=72,K_i=8} \geq 3\} = 0,$$

$$S = 42, S_{i=72,K_i=8} = 40,$$

$$S - S_{i=72,K_i=8} = 2$$

Then,

$$R_{i=72}^*(t = 3) = 1/8 \times [5 + 0 \times 0],$$

$$R_{i=72}^*(t = 3) = 0,625$$

It is certificates with the R code,

```
fit<-Counting.Processes.WC(TBCplapyr, "TBCplapyr", 72, 72,
"black", "pink",1,1,42,T=3)
```

The output is,

```
=====
Processes counters WC
=====
d*(T = 3) = 0,25
R*(T = 3) = 0,625
I{T = 3} = 2
S = 42
=====
```

Example N° 2. On this example, we were used TBCplapy dataset of TestSurvRec package. On the procedure, were estimates the counting processes

and survival function of the estimator WC for all patients of the dataset, and was used the Plot.Counting.Processes.WC function created on R language.

```
>require(TestSurvRec)
>require(survrec)
>data(TBCplapyr)
>fit1 <- wc.fit(Surv(TBCplapyr$Tcal,TBCplapyr$Tcal,
TBCplapyr$event))
>d <- fit1$time
>for (p in 1:length(d))
>fit <- Counting.Processes.WC(TBCplapyr, "TBCplapyr",
From = 1, To = max(TBCplapyr$Tcal), colevent="black",
colcensored = "pink",
ltyx = 1, lwdx = 1, S = max(TBCplapyr$Tcal), T = d[p])
```

To continuation, we show an abstract of the output of the function "Plot.Counting.Processes.WC". On the abstract, we present the results of the outputs of the first and the last calculations of the counting processes for the units of study, as it is appreciate below,

```
=====
Counting Processes of WC
=====
d*(T = 1) = 2,25
R*(T = 1) = 78
I{T = 1} = 5
S = 64
=====

Processes counters WC
=====
d*(T = 44) = 0,5
R*(T = 44) = 6,5
I{T = 44} = 1
S = 64
=====
```

The Table 1 presents the estimations of the survival curves $S(t)$ using WC model. For these estimation are used the equations (1), (2), (3) and (4).

4.2. Illustration of counting processes of PSH estimator

Example N° 3. For this example, also we use TBCplapy dataset of TestSurvRec package. On the procedure, we explicate as to estimate the counting processes of the estimator PHS for the patient with id equal to 72. To continuation, we shows the calculates,

For the calculate of $N_i(s, t)$ is used the equation (6), $i = 72, s = 64$ and $t = 3$,

Table 1: Estimation of S(t), WC Model.

S	t	$d^*(t)$	$R^*(t)$	(1)	(2)
64	1	2,2500	78,0000	0,971 2	0,971 2
64	2	3,6167	74,7500	0,953 0	0,925 5
64	3	7,6667	70,2333	0,890 8	0,824 4
64	4	3,8694	62,5667	0,938 2	0,773 5
64	5	4,1972	56,6972	0,926 0	0,716 2
64	6	5,0361	52,5000	0,904 1	0,647 5
64	7	1,0194	47,4639	0,978 5	0,633 6
64	8	1,1500	44,4444	0,974 1	0,617 2
64	10	1,5167	42,2944	0,964 1	0,595 1
64	11	1,8333	40,7778	0,955 0	0,568 3
64	12	2,0250	37,9444	0,946 6	0,538 0
64	13	0,5694	35,9194	0,984 1	0,529 4
64	14	0,9000	35,3500	0,974 5	0,516 0
64	15	0,4583	32,4500	0,985 9	0,508 7
64	16	0,2917	31,9977	0,990 9	0,504 0
64	17	1,0000	31,7000	0,968 5	0,488 1
64	18	1,0000	30,7000	0,967 4	0,472 2
64	24	0,5000	27,7000	0,981 9	0,463 7
64	25	1,0000	27,2000	0,963 2	0,446 7
64	28	0,5000	24,2000	0,979 3	0,437 4
64	29	1,0000	23,7000	0,957 8	0,419 0
64	31	0,2000	18,7000	0,989 3	0,414 5
64	35	1,0000	14,5000	0,931 0	0,385 9
64	42	1,0000	7,5000	0,866 7	0,334 5
64	44	0,5000	6,5000	0,923 1	0,308 7

(1): $P(t) = 1 - d^*(t)/R^*(t)$
 (2): $S(t)$

$$N_{i=72}(s = 64, t = 3) = \sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} \leq 3\}$$

On the figure N° 1 is shows that,

$$K_{i=72}(s = 64) = 8$$

and $\sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} \leq 3\} = 5$, so,

$$N_{i=72}(s = 64, t = 3) = 5$$

For, $t=2$ and $s=64$,

$$N_{i=72}(s = 64, t = 2) = \sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} \leq 2\}$$

So, $N_{i=72}(s = 64, t = 2) = 3$

See that, for, t=2 and s=64,

$$\Delta N_{i=72}(s = 64, t = 3) = N_{i=72}(s = 64, t = 3) - N_{i=72}(s = 64, t = 2)$$

$$\Delta N_{i=72}(s = 64, t = 3) = 5 - 3 \text{ or } \Delta N_{i=72}(s = 64, t = 3) = 2$$

$$\Delta N_{i=72}(s = 64, t = 2) = \sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} = 3\}$$

$$\Delta N_{i=72}(s = 64, t = 3) = 2$$

So, it is obtained the same result that before method and,

$$\Delta N(s, t) = \sum_{j=1}^{K_i(s)} I\{T_{ij} = t\}$$

$$\Delta N(s, t) = \sum_{j=1}^{K_i(s)} I\{T_{ij} \leq t + \Delta t\} - \sum_{j=1}^{K_i(s)} I\{T_{ij} < t + \Delta t\}$$

For the calculate of $Y_i(s, t)$ is used the equation (8). So with $i = 72, t = 3$ and $s = 64,$

$$Y_{i=72}(s = 64, t = 3) = \sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} \geq 3\} + I\{\tau_i - S_{i=72,j} \geq 3\}$$

Of the figure 1, we have that $K_{i=72}(s = 64) = 9$ and $\sum_{j=1}^{K_{i=72}(s=64)} I\{T_{i=72,j} \geq 3\} = 5$ so,

$$Y_{i=72}(s = 64, t = 3) = 6$$

It is certificates with the R code,

```
fit<-Counting.Processes.PSH(TBCplapyr, "TBCplapyr", 72, 72,
"black", "pink",1,1, S = 64,T=3)
```

Output of the R code,

```
=====  
Processes counters for PSH  
=====  
K(S = 64) = 9  
N(S = 64, T = 3) = 5  
Y(S = 64, T = 3) = 6  
{ T = 3 } = 2  
=====
```

Example N° 4. For this example, also were use the TBCplapy dataset of the TestSurvRec package. On the procedure, were estimated the counting processes of the estimator PSH for all patients and was used the function created on R language. Code on R-language for the estimation of PSH estimator.

```
>require(TestSurvRec)  
>require(survrec)  
>data(TBCplapyr)  
>fit1<-psh.fit(Survvr(TBCplapyr$Sid,  
TBCplapyr$time,TBCplapyr$event))  
>d<-fit1$time  
>for (p in 1:length(d))  
>fit<- Counting.Processes.PSH( TBCplapyr, "TBCplapyr", From = 1,  
To = max(TBCplapyr$Sid), colevent = "black", colcensored = "blue",  
ltyx = 1, lwdx = 1, S = max(TBCplapyr$Tcal),T = d[p])
```

To continuation is shows the output of the function "Plot.Counting.Processes.PSH". On the abstract, its present the results of the outputs of the first and the last calculations of the counting processes, its show as follow,

```
=====  
Counting processes for PSH  
=====  
K(S = 64) = 222  
N(S = 64, T = 1) = 5  
Y(S = 64, T = 1) = 211  
{ T = 1 } = 5  
=====  
Processes counters for PSH  
=====  
K(S = 64) = 222  
N(S = 64, T = 44) = 144  
Y(S = 64, T = 44) = 7  
{ T = 44 } = 1  
=====
```

The Table 2 present the estimations of $S(s,t)$ using PSH model. For these calculates are used the equations (5), (6), (7) and (8).

5. Concluding remarks

We have reviewed two nonparametric models of the survival analysis with recurrent events based on the counting processes, specifically WC and PSH models. This article provides important computerized and graphics tools to estimate the counting processes of the survival analysis with recurrent events. For the estimation of survival function on both models, we required of a dataset with a similar structure that the datasets of the TestSurvRec package. Details of calculations procedure of the counting processes are showed. Methods of estimation of the survival function are described, and illustrative examples are explicated. We hope that this article be useful and of great benefit to researchers from this area of research. We hope that with the design of this program, the survival analysis with recurrent events will be greatly facilitated.

Table 2: Estimation of $S(s,t)$, PSH Model.

S	t	(1)	(2)	(3)	(4)
64	1	5	211	0,976 3	0,976 3
64	2	15	205	0,926 8	0,904 9
64	3	26	186	0,860 2	0,778 4
64	4	19	159	0,880 5	0,685 4
64	5	12	135	0,911 1	0,624 4
64	6	18	123	0,853 7	0,533 1
64	7	5	102	0,951 0	0,506 9
64	8	6	92	0,934 8	0,473 9
64	10	8	82	0,902 4	0,427 6
64	11	3	73	0,958 9	0,410 1
64	12	7	69	0,898 6	0,368 5
64	13	3	61	0,950 8	0,350 3
64	14	3	57	0,947 4	0,331 9
64	15	2	52	0,961 5	0,319 1
64	16	2	48	0,958 3	0,305 8
64	17	1	44	0,977 3	0,298 9
64	18	1	43	0,976 7	0,291 9
64	24	1	39	0,974 4	0,284 5
64	25	1	38	0,973 7	0,277 0
64	28	1	32	0,968 8	0,268 3
64	29	1	31	0,967 7	0,259 7
64	31	1	25	0,960 0	0,249 3
64	35	1	19	0,947 4	0,236 2
64	42	1	8	0,875 0	0,206 6
64	44	1	7	0,857 1	0,177 1

(1): $\Delta N(s, t)$ (2): $Y(s, t)$
(3): $P(s, t) = 1 - \Delta N(s, t)/Y(s, t)$
(4): $S(s, t)$

Acknowledgements

Thanks you to the participants of the first postdoctoral of statistic of the UCV for yours helpful comments on the revisions for this paper.

Referencias

- [1] Thomas R Fleming and David P Harrington. *Counting processes and survival analysis*, volume 169. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Per Kragh Andersen and Richard D Gill. Cox's regression model for counting processes: a large sample study. *The annals of statistics*, 10(4):1100–1120, 1982.
- [3] Odd Aalen. Nonparametric inference for a family of counting processes. *The Annals of Statistics*, 6(4):701–726, 1978.
- [4] Mei-Cheng Wang and Shu-Hui Chang. Nonparametric estimation of a recurrent survival function. *Journal of the American Statistical Association*, 94(445):146–153, 1999.

- [5] Edsel A Peña, RL Strawderman, and Myles Hollander. Nonparametric estimation with recurrent event data. *Journal of the American Statistical Association*, 96(456):1299–1315, 2001.
- [6] J. R. González, E. A. Peña, and Strawderman R. L. The survrec package. Tech report, The Comprehensive R Archive Network, 2002.
- [7] Therneau T. A package for survival analysis in S. R package version 2.37-7. Tech report, The Comprehensive R Archive Network, 2014.
- [8] C. M. Martínez. Testsurvrec: Statistical tests to compare two survival curves with recurrent events. R package version 1.2.1. Tech report, The Comprehensive R Archive Network, 2013.



Dr. Carlos Martínez is professor at the University of Carabobo. He is affiliate to the Department of Operations Research at the School of Industrial Engineering. Is Industrial Engineer by profession, has a Masters in the same area and a PhD in the area of Statistics of the Central University of Venezuela. His research interests are: the area of modeling

longitudinal data analysis and multivariate cross-sectional data, works specifically on reliability studies and survival. In the area of operations research has conducted research on issues related to the topic of location of facilities and with linear and nonlinear problems. Currently, he is working on the modeling of figures in low and high dimension and has expressed interest in investigating the theory of numbers. He has experience in designing computer algorithms including language R.

Development of a software to obtain a system of linear equations from a vectorized fluid network.

A. Bolívar*, A. Almarza

Departamento de Computación, Estudios básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

Analysis of fluid networks constitutes a case of study of greater importance and impact from the point of view of engineering, in which are involved sequences of iterative calculations which usually have some complexity. In this sense, it was developed a software to obtain the system of equations corresponding to a network of distribution of fluid from its respective drawing into Computer Aided Design (CAD) and the corresponding solution, using the linear theoretical method to obtain the flow that circulates through each pipe. This method shows a very rapid convergence and presents a great advantage over other methods of calculation, such as Hardy-Cross and Newton, since it does not require initialization of flow for each pipe. The network is drawn in CAD using lines, and the software is responsible to form automatically the system of equations, formed by the equations of continuity on nodes and balance of energy in loops, allowing user to supply characteristics of the fluid and pipe. The supplied network may be modified in the drawing and the program calculates the new distribution of flow.

Keywords: software; fluid; pipe networks; linear theory method; CAD.

Desarrollo de un software para la obtención del sistema de ecuaciones lineales de una red de fluido vectorizada.

Resumen.-

El análisis de las redes de fluido constituye una de las situaciones de estudio de mayor importancia e impacto desde el punto de vista de ingeniería, en donde se involucran secuencias de cálculos iterativos que suelen tener cierto grado de complejidad. En este sentido, se desarrolló un software que permite en primer lugar obtener el sistema de ecuaciones correspondiente a una red de distribución de fluido a partir de su respectivo dibujo en Diseño Asistido por Computadora, CAD por sus siglas en inglés y la solución correspondiente, empleando el método teórico lineal para obtener el caudal que circula por cada tubería. Este método muestra una convergencia muy rápida y presenta una gran ventaja sobre otros métodos de cálculo, como Hardy-Cross y Newton, ya que no requiere la inicialización de caudal para cada tubería. La red se dibuja en CAD mediante líneas, y el software se encarga de formar automáticamente el sistema de ecuaciones inicial, conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos, permitiendo que el usuario suministre las características del fluido y de las tuberías. La red suministrada puede ser modificada en el dibujo y el programa calcula la nueva distribución de caudal.

Palabras clave: software; fluido; redes de tuberías; método teórico lineal; CAD.

Recibido: Junio 2015

Aceptado: Marzo 2016

1. Introducción.

En las redes de distribución de fluido resulta necesario evaluar las condiciones de operación tanto en una red nueva, así como en otras en las que se hagan modificaciones, tales como cambio

*Autor para correspondencia

Correo-e: abolivar@uc.edu.ve (A. Bolívar)

de accesorios, válvulas o extensiones de los tramos de tubería, teniendo como premisa que la red puede presentar diversas disposiciones o arreglos según las conexiones con accesorios tipo ‘Y’, ‘T’ y cruz entre otros; los cuales permiten dirigir el fluido a un lugar determinado y con condiciones particulares de disponibilidad y caudal; además de tener en cuenta que, con el paso del tiempo, se produce el envejecimiento de las tuberías y obstrucciones que afectan su funcionamiento y que en muchos casos obliga a modificar la red, agregando o eliminando tramos de tuberías y accesorios. En tal sentido, frente al carácter, sí se quiere dinámico, de este tipo de sistemas, se plantea la necesidad de efectuar con frecuencia los cálculos pertinentes para determinar el caudal de fluido que circula por cada tubería, de esta manera, con la intención de permitir que ese proceso de evaluación sea realizado de una forma más sencilla y expedita, se ha desarrollado un software tomando como punto de partida el fluido circulante, las características de las tuberías y los caudales externos a la red.

El programa diseñado, analiza e interpreta la red dibujada en un archivo de dibujo asistido por computadora (CAD), el cual se utiliza ampliamente en el mundo con fines de edición de dibujos y combina la digitalización de la red con la programación de rutinas para la detección, análisis y el cálculo de la red de fluidos a través del módulo de programación con Visual Basic Application (VBA) en AutoCAD 2015. Lo cual constituye un valor agregado con respecto a otros programas como EPANET y EpaCAD, en los que se desarrollan elaboradas ventanas para la introducción de datos de la red o graficadores particulares para dibujarla.

Así, el trabajo se centra en el desarrollo de un programa que permite obtener el sistema de ecuaciones de una red de fluido cerrada previamente dibujada en CAD, y su solución mediante el método teórico lineal que tiene entre sus ventajas, la forma más sencilla de realizar el cálculo iterativo, que consiste en utilizar los caudales obtenidos en la resolución del sistema linealizado de ecuaciones en una iteración para calcular los nuevos coeficientes que se utilizarán

en la iteración siguiente [1].

Para la consecución de este fin se desarrolló:

- Un subprograma para reconocer los nodos y los tramos en una red cerrada dibujada en base a líneas en un archivo de dibujo en CAD.
- El subprograma para el ordenamiento y enumeración de los nodos y lazos de la red.
- Un subprograma para crear la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones de la red, conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos de dicha red.
- Un subprograma para aplicar el método teórico lineal debido a que este método no requiere la suposición previa de caudales en cada tramo.

2. Marco teórico

El uso de las aplicaciones CAD es muy extenso tanto a pequeña como a gran escala, el diseño de casas, edificios, conjuntos residenciales e inclusive poblaciones se puede digitalizar y tener disponible para la implementación de aplicaciones como la desarrollada en este estudio, inclusive se pueden obtener de otras aplicaciones como Google Earth las distribuciones geográficas necesarias para la elaboración de la red de fluido [2].

Las aplicaciones como Mathcad pueden ser utilizadas para implementar métodos de resolución de sistemas de tuberías abiertas como estrategia didáctica en el aprendizaje del tema, lo cual adicionalmente agiliza el procedimiento de análisis hidráulico. Similarmente se han desarrollado software tanto comerciales (WaterCAD, AFT Fathom, CivilCAD, Cadpipe, entre otros) como de investigación (EpaCAD, EPANET y otros de universidades e institutos) que permiten por un lado dibujar la red, convertirla a un fichero interpretable por algún simulador, o simular dinámicamente el comportamiento hidráulico, siendo estos elementos los claves que son tomados en consideración para su aplicación de manera integrada en el diseño del software [3].

2.1. Algoritmo de Búsqueda en Profundidad

La idea general detrás de una búsqueda en profundidad comienza fijando como nodo actual al nodo de inicio combinándolo con una pila vacía en la cual se irá guardando los nodos visitados. En cada paso se toma como nodo actual a un nodo adyacente o vecino que no esté en la pila y se insertará en la misma. Al llegar a un nodo sin nodos adyacentes que no estén en la pila, se volverá al nodo anterior que se encuentra ubicado en la cima de la pila. Si se alcanza el nodo destino, se tendrá una solución posible en la pila, además puede operarse como si éste fuera un nodo infructuoso a fin de realizar una búsqueda exhaustiva que ofrezca la solución óptima, o todas las soluciones posibles (cuando esto es necesario) [4]. En el programa desarrollado, el retroceso se logra usando una lista que almacena los vértices iniciales de futuros caminos posibles. También se realiza una búsqueda que indica el estado actual de cualquier vértice, de modo que ningún vértice sea procesado más de una vez.

2.2. Microsoft Visual Basic para Aplicaciones (VBA).

Desde el punto de vista de programación, se combinan dos paradigmas refiriéndose en primer lugar a programación estructurada para el diseño de las subrutinas de cálculo y su posterior ejecución secuencial y el paradigma de programación orientada a objetos que permite el manejo de los atributos y propiedades de cada componente de la red de fluidos dibujada en CAD y utiliza conceptos como la abstracción de datos, la encapsulación de la información, la herencia y el polimorfismo [5]. En lo referente a la programación orientada a objetos, se controla a través de manejo de eventos, donde el usuario realiza acciones sobre dichos objetos. Según el objeto y la acción de que se trate se ejecutará la rutina asociada. Las aplicaciones contienen una colección de bloques de instrucciones a los que se denomina procedimientos, que se pueden agrupar en módulos [6].

Gracias al entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment, IDE), VBA permite desarrollar aplicaciones con gran rapidez, controlando, desde la propia etapa de diseño, el

ambiente de las diversas ventanas del programa. Además, Visual Basic es un lenguaje muy fácil de aprender y utilizar.

La programación con VBA en AutoCAD viene definida por tres elementos esenciales. El primero de ellos es AutoCAD, que dispone de un extenso conjunto de objetos entre los que se incluyen entidades, datos y comandos de AutoCAD. AutoCAD es una aplicación de arquitectura abierta con varios niveles de interfaz. Para utilizar VBA de manera eficaz, es recomendable estar familiarizado con la programación en AutoCAD.

El segundo elemento es la interfaz AutoCAD ActiveX Automation, que intercambia mensajes (establece una comunicación) con los objetos de AutoCAD. La programación en VBA requiere comprender los fundamentos de ActiveX Automation. El tercer elemento que define la programación en este entorno es VBA. Incluye su propio conjunto de objetos, palabras clave, constantes, etc., que proporcionan el flujo de programación y funciones de control, limpieza y ejecución. AutoCAD VBA incluye un sistema de ayuda propio de Microsoft para AutoCAD VBA.

Los programas, macros y proyectos de VBA se almacenan en un archivo independiente con la extensión .dvb, debido a esto un proyecto de VBA puede operar sobre diferentes dibujos de AutoCAD durante una sesión de este programa. Para cargar un proyecto de VBA debe utilizar el comando VBACARGAR. Una vez cargado, sus módulos y macros estarán disponibles en el cuadro de diálogo Macros. Para ejecutar el módulo VBA debe utilizar el comando VBAEJECUTAR.

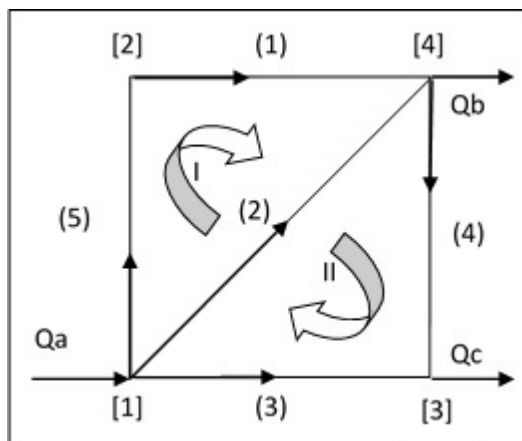
2.3. Redes de Tuberías.

Las redes de tuberías pueden ser abiertas, cerradas y mixtas; y son sistemas de distribución de fluidos que están constituidos por tramos de tuberías, puntos de toma y descarga de fluido [7]. Un tramo es una tubería que une dos nodos, un nodo es un punto de confluencia de las tuberías o de empalme con tanques externos, y un lazo es el conjunto de tramos que forman un circuito cerrado.

Cuando los sistemas se hacen complejos, la solución de la red mediante gráficas es muy

complicada, por lo tanto se recurre a buscar una solución numérica computacional. Para evaluar una red de tuberías, se debe garantizar que se cumplan las ecuaciones de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de esta.

La búsqueda en profundidad permite en gran parte resolver el problema de distribución de fluidos, su objetivo principal en este programa consiste en determinar la conexión entre los nodos (punto de confluencia de las tuberías) y buscar los diferentes caminos para la conformación de lazos. Esto facilita la aplicación de las ecuaciones de continuidad en los nodos y las ecuaciones de balance de energía en los lazos de la red de distribución. En la red de distribución de fluido (Figura 1) se establece un sentido de recorrido del lazo de forma horaria, y según este sentido, la pérdida en la tubería se considera negativa cuando el caudal recorre el circuito en el mismo sentido y positivo en caso contrario.



[]: Nodos (): Tramos I, II: Lazos
 Qa, Qb, Qc: Caudales externos
 ⤷: indica el sentido

Figura 1: Red de distribución de fluido.

En una red de tuberías cerrada que presenta “N” tuberías, con “J” nodos y “L” lazos se debe cumplir la ecuación (1).

$$N = (J - 1) + L \tag{1}$$

donde:

N: Cantidad de ecuaciones independientes del sistema.

(J - 1): Cantidad de ecuaciones de continuidad independientes, las cuales son lineales en Q (caudal).

L: Cantidad de lazos necesarios para completar el sistema de ecuaciones.

En las redes de fluidos se cumplen dos leyes similares a las de Kirchoff para sistemas eléctricos, las cuales son [8]:

1. La suma de los caudales que llegan a un nodo dado es igual a la suma de los caudales que salen de dicho nodo. (esta es una forma de enunciar la Ley de Continuidad).
2. La suma algebraica de las pérdidas de carga en un circuito cerrado de una red debe ser nula. (este es un balance energético que se debe realizar en cada malla o circuito).

Ambas leyes se cumplen bajo el supuesto de que las variables no dependen del tiempo (estado estacionario).

Para cada nodo de la red se debe cumplir la ecuación (2).

$$Q_{externo} + \sum (Q_i)_{entra} - \sum (Q_i)_{sale} = 0 \tag{2}$$

donde:

Q_{externo}: Caudal externo a la red en el nodo, [m³/h].

Q_{i_entrada}: Caudales que entran al nodo, [m³/h].

Q_{i_salida}: Caudales que salen del nodo, [m³/h].

Existen L ecuaciones independientes de balance de energía en cada lazo, las cuales en general no son lineales en Q.

Para un lazo en particular se cumple la ecuación (3).

$$\sum hi = \sum ki Qi^n = 0 \tag{3}$$

donde:

i: Número identificador de la tubería.

h: Pérdida por fricción en la tubería, [m].

k: Coeficiente de fricción de la tubería, adimensional.

Q: Caudal que circula en la tubería [m³/h].

n: exponente que depende del modelo utilizado para evaluar hi (el modelo de Darcy [9] utiliza n = 2).

Al plantear las relaciones mencionadas se crea un sistema de ecuaciones, en el que se puede observar que el número de ecuaciones disponibles coincide con el número de incógnitas (caudal por cada tramo). En redes de flujo complejas, el número de ecuaciones resultante puede ser grande, por lo que la solución simultánea amerita generalmente el uso de un computador.

2.4. Pérdidas por fricción en tuberías.

El modelo básico para el cálculo de pérdida por fricción en las tuberías es el de Darcy-Weisbach y se expresa en la ecuación (4).

$$h = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (4)$$

donde:

h : Pérdida de carga [m].

f : Coeficiente de fricción de la tubería, adimensional.

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro interno de la tubería [m].

$\frac{V^2}{2g}$: Altura de velocidad [m].

g : Aceleración de gravedad $9,81m/s^2$.

2.5. Coeficiente de fricción.

La determinación del coeficiente de fricción dependerá del régimen de flujo existente. Así, para el régimen laminar que implica un número de Reynolds menor o igual a 2000 ($Re \leq 2000$), en tuberías circulares lisas o rugosas y para cualquier fluido incompresible, se tiene un comportamiento como el mostrado en la ecuación (5), desarrollado por Hagen-Poiseuille [9, 10, 11, 12].

$$f = 64/Re \quad (5)$$

En el caso de régimen turbulento ($Re > 2000$), se emplea la aproximación de Steffenson, expresada mediante la ecuación (6).

$$f = \left(A - \frac{(B - A)^2}{C - 2B + A} \right)^{-2} \quad (6)$$

Siendo el comportamiento de los parámetros A, B y C, los que se muestran en las ecuaciones (7),

(8) y (9) respectivamente, estimado el número de Reynolds según la ecuación (10).

$$A = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{12}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (7)$$

$$B = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{2,51A}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (8)$$

$$C = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{2,51B}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (9)$$

$$Re = \frac{Q\rho 277777,78}{D\nu} \quad (10)$$

donde:

Re : Número de Reynolds, adimensional.

Q : Caudal [m^3/h].

ρ : Densidad [g/cm^3].

ν : Viscosidad cinemática [cP].

D : Diámetro interno de la tubería [mm].

ϵ : Rugosidad relativa [mm].

Con el valor del factor de fricción (f), se determina el coeficiente de fricción (Kf) de la tubería como se indica en la ecuación (11).

$$Kf = \frac{fL1000}{D} \quad (11)$$

donde:

f : Factor de fricción, adimensional.

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro interno de la tubería [mm].

2.6. Método Teórico Lineal.

Este método fue desarrollado por D. J. Woody y C. O. A. Charles, y se basa en la linealización de las ecuaciones de energía en cada una de las tuberías de la red con el fin de resolver simultáneamente las ecuaciones de la conservación de masa en los nodos y de energía en los circuitos, para determinar el caudal en cada tubería, el método ofrece dos ventajas importantes [7, 13]:

- No requiere suponer una distribución inicial de caudales en cada tramo.

- Converge rápidamente a la solución en pocas iteraciones.

La base del método consiste en la transformación lineal de las ecuaciones de pérdida como lo muestra la ecuación (12).

$$hi = kiQi^n = (kiQi_{(i-1)}^{n-1})Qi = ki' Qi \quad (12)$$

donde:

$ki' = (kiQi_{(i-1)}^{n-1})$ [adimensional]

$Qi_{(i-1)}$: Caudal tentativo que circula en el tramo 'i' para la iteración '(i-1)' en $[m^3/h]$

La solución se obtiene cuando $Qi_{(i-1)}$ se aproxima a Qi de acuerdo a algún criterio de error preestablecido.

La convergencia hacia la solución se realiza mediante un proceso iterativo que se inicia haciendo $ki' = ki$. Esto equivale a fijar un caudal unitario de cada uno de los tramos; es decir, $Qi_{(0)} = 1$.

Para evitar la oscilación en torno a la solución final, se recomienda que después de resolver dos iteraciones consecutivas: $Qi_{(n-1)}$ y $Qi_{(n-2)}$, se proceda a obtener un caudal promedio para la iteración 'n' ($Qi_{(n)}$) como lo presenta la ecuación (13).

$$Qi_{(n)} = \frac{(Qi_{(n-1)} + Qi_{(n-2)})}{2} [m^3/h] \quad (13)$$

3. Metodología.

A continuación se exponen las instrucciones ejecutadas en cada una de las etapas del proceso de obtención del sistema de ecuaciones lineal a partir del dibujo de una red de fluidos en CAD y la resolución que permite determinar los caudales que circulan por cada tramo de la red.

3.1. Aspectos computacionales para la detección de objetos en AutoCAD® mediante VBAapplication.

La codificación en Visual Basic Application (VBA) para AutoCAD 2015 permite recorrer en el archivo de dibujo activo todos los objetos que contiene, esto se puede hacer mediante la implementación de un ciclo [14] como se muestra en la Figura 2.

```
For Each entry In ThisDrawing.ModelSpace
...
Next
```

Figura 2: Estructura cíclica para recorrer por todos los objetos del dibujo.

```
If entry.ObjectName="AcDbLine"Then
...
End If
```

Figura 3: Estructura condicional para detectar si el objeto es una línea.

En este trabajo se necesita detectar cuales objetos son líneas mediante la condición que se muestra en la Figura 3.

Se puede obtener de cada una de estas líneas las coordenadas de los extremos con la instrucción de la Figura 4.

```
a=entry.startPoint 'devuelve el punto inicial de la línea'
b=entry.endPoint 'devuelve el punto final de la línea'
```

Figura 4: Instrucciones para almacenar las coordenadas de los puntos extremos de una línea.

Estas coordenadas se deben almacenar en variables de tipo *Variant*, las cuales se manejan posteriormente como un vector de tal manera que si se almacena un punto inicial mediante la instrucción $a = entry.startPoint$, la abscisa se obtiene con $a(0)$ y la ordenada con $a(1)$. Adicionalmente, se pueden obtener otros datos como la longitud de la línea y su identificador mediante los métodos $entry.Length$ y $entry.Handle$.

3.2. Datos de entrada.

Los datos de entrada corresponden a todas aquellas variables necesarias provenientes del archivo de dibujo, fluido, tuberías y nodos para resolver la red de fluido. En esta aplicación los datos de entrada son captados en diferentes pestañas: Fluidos, Tuberías y Caudales Externos:

- La red es dibujada mediante el comando Línea representando un tramo de tubería en un archivo de extensión .dwg, estas líneas

deben estar debidamente conectadas entre sí en los extremos para formar la red de tuberías.

- Se carga el programa VBA para AutoCAD y se ejecuta.
- Al cargar el programa, del dibujo se obtiene automáticamente el número de nodos y de tuberías, de las cuales se deduce la cantidad de lazos.
- En la Figura 7 se tiene las propiedades del fluido (pestaña *Fluido*), densidad [g/cm^3] y viscosidad cinemática [cP].
- En la Figura 10 se tiene los datos de las tuberías (pestaña *Tuberías*), en la cual se introduce el valor del coeficiente de fricción directamente o el diámetro interno [m] y la rugosidad, la longitud se obtiene del dibujo.
- En la Figura 12 (pestaña *Caudales Externos*), se ingresa el caudal externo [m^3/h] y su respectivo número del nodo.

3.3. Detección de nodos.

A partir del archivo de dibujo previamente elaborado, se procede a analizar la red de fluido mediante un programa en VBA para AutoCAD.

En primer lugar se obtienen las coordenadas de los puntos extremos (nodos) de todas las líneas dibujadas (*tramos*) en el dibujo activo, adicionalmente se guarda en el arreglo de datos de las tuberías su longitud, en caso de necesitarse para calcular el coeficiente de la tubería. Las coordenadas de los nodos son almacenadas en dos listas las cuales contienen por separado la abscisa y la ordenada, sin repetirse. Adicionalmente se almacenan en una lista los manejadores (*handle*) de cada una de las líneas encontradas.

Una vez que se obtienen las coordenadas de todos los nodos, dicha cantidad de elementos representa la cantidad de nodos de la red de fluido y la cantidad de elementos en la lista de manejadores es la cantidad de tramos, con estos dos datos se calcula, mediante la ecuación (1), la cantidad de lazos necesarios para crear el sistema de ecuaciones para la solución de la red.

En el caso de estudio, en el cual no existe restricción con respecto al sentido de flujo, una tubería puede presentar dos sentidos de flujo, por ejemplo entre los nodos 1 y 2 de una tubería, el fluido puede circular de 1 a 2 o viceversa, esto conlleva a realizar todas las combinaciones posibles para obtener los caminos de los lazos. Para efectos de la asignación inicial del sentido de flujo, éste depende del punto inicial y del punto final almacenado en la base de datos del dibujo.

3.4. Ordenamiento de los nodos y tramos.

Los nodos se ordenan de acuerdo a las listas de coordenadas, primeramente se ordena la lista de abscisas y luego las ordenadas utilizando el método de ordenamiento *quicksort* debido al volumen de datos que deben organizarse [15] recibiendo como parámetros: el arreglo a ordenar, la posición inicial, final y la columna de los elementos a ordenar, el orden se realiza en forma ascendente por lo tanto las coordenadas se ordenan de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. Luego de ordenar las listas de coordenadas se procede a escribir el número de cada nodo en el archivo de dibujo.

El ordenamiento de tramos se realiza recorriendo la lista de abscisa y se busca en la lista de líneas; una vez encontrada se almacena en otra lista en el orden en que se encuentran, esto asegura que el orden de enumeración sea de izquierda a derecha y en lo posible de abajo hacia arriba y finalmente se escribe el número a cada tramo en el archivo de dibujo.

3.5. Detección de los posibles lazos mediante una búsqueda en profundidad.

Inicialmente, se listan en un arreglo bidimensional los nodos conectados al nodo inicial (Figura 5). El arreglo inicial tiene una cantidad de filas igual a la cantidad de tramos denotados por la unión del nodo inicial y el nodo final, dicho arreglo se incrementa en la unidad a medida que se consiguen los caminos posibles para formar un lazo, los caminos que no forman un lazo son descartados.

En el arreglo inicial, cada fila corresponde a los nodos adyacentes al nodo inicial del lazo,

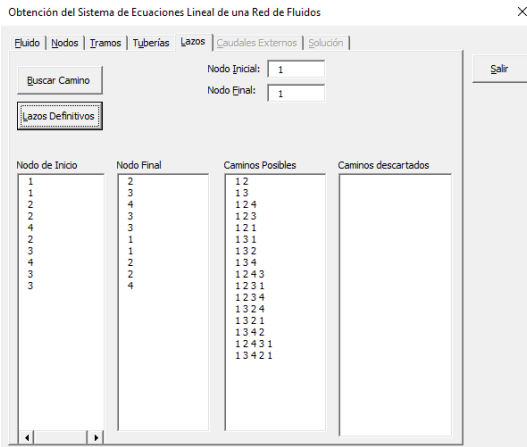


Figura 5: Etapas para la determinación de los lazos.

seguidamente se toma el nodo ubicado en la primera fila, segunda columna correspondiente al primer nodo adyacente, para determinar los diferentes caminos a partir de este tramo y que puedan formar un lazo.

El nodo seleccionado representa el punto de inicio de la búsqueda en profundidad, el mismo se busca en el arreglo de conexiones de nodo, si se encuentra entonces es un nodo tentativo a formar un camino. El nodo tentativo se busca en el camino ya recorrido, sí no es encontrado, se agrega una fila y una columna a la matriz y se copia el nodo tentativo en esta última fila y última columna creada en este instante. En las celdas anteriores se escriben los nodos recorridos para formar el nuevo camino. Finalmente se pasa a la siguiente fila y así sucesivamente hasta que se generen todos los caminos posibles (Figura 5), que representa los datos de la red en la discusión de resultados de la Figura 9.

3.6. Generación de lazos.

La siguiente etapa es buscar los lazos definitivos que formarán parte del sistema de ecuaciones, para ello se busca en la matriz de caminos posible, aquellos que cumplan las siguientes condiciones de lazo:

- El camino tiene 4 nodos o más.
- El camino inicia y finaliza en el mismo nodo (lazo cerrado).

- El camino recorre la menor cantidad de tramos posibles.

Para cada camino se cuentan los nodos que contiene y se verifica que el último nodo corresponda con el nodo final requerido. Al encontrar un camino que forme un lazo, se busca en los caminos restantes cual tiene el mismo recorrido y se procede a descartarlo, de manera similar el resto de los caminos se revisan hasta obtener la cantidad de lazos necesarios para formar el sistema de ecuaciones.

3.7. Creación del sistema de ecuaciones.

Los valores del coeficiente de resistencia para cada tubería se introducen como datos por teclado en la pestaña *Tuberías* del programa (Figura 10), con éstos se crea el sistema inicial de ecuaciones; los valores de los caudales externos también se introducen a través de la interfaz. El sistema de ecuaciones está conformado por $(J - 1)$ ecuaciones de continuidad en los nodos y (L) ecuaciones de balance de energía en los lazos.

El sistema de ecuaciones se forma aplicando la ley de nodos y la ley de lazos, primeramente se busca en la lista de nodos la dirección de flujo en cada nodo, si el flujo sale del nodo se escribe -1 en el arreglo en la celda correspondiente a la posición en la que se encuentre en la lista, y en caso contrario si entra el flujo al nodo se escribe +1 en dicha posición (Figura 13).

Posteriormente aplicando la ley de lazos se escriben los valores del coeficiente de fricción del tramo respectivo, para ello se recorre la matriz de lazos y adicionalmente se ubica el índice del tramo respectivo lo que va a permitir el acceso a la lista de coeficientes, si el flujo en el tramo tiene el mismo sentido del recorrido del lazo entonces es negativo de lo contrario es positivo.

Para la aplicación del método teórico lineal se requiere la solución del sistema de ecuaciones hasta que se cumpla con el criterio de error establecido. Los valores obtenidos como resultado de la resolución del sistema de ecuaciones final [16], representa el caudal que circula por cada tramo, se debe tomar en cuenta que si algún valor es negativo, significa que la dirección de flujo es en sentido contrario al supuesto inicialmente.

3.8. Resultados.

Los caudales obtenidos en este programa son escritos en el archivo de dibujo en una capa denominada Caudales mediante la instrucción de la Figura 6.

```
SettextObj=ThisDrawing.ModelSpace.AddText(texto,ptm,5)
textObj.Layer="Caudales"
```

Figura 6: Creación de texto en la capa Caudales.

La ubicación del texto es lo más cercano a cada una de las líneas correspondientes a las tuberías de la red para tener una mejor visibilidad del comportamiento de esta. En el caso de ejecutar nuevamente la aplicación con valores diferentes, para evitar sobrescribir los resultados, se debe proceder a borrar previamente los caudales y direcciones de flujo determinadas en el cálculo anterior, procediéndose de igual manera sí se desea modificar la red, eliminando o agregando otras líneas.

4. Presentación, análisis y discusión de resultados.

Ejemplo 1. Procedimiento de cálculo.

La secuencia de introducción de datos, su procesamiento e impresión de resultados, se desarrolla de la siguiente manera.

Inicialmente, se digitaliza en CAD la red de fluidos mediante el comando *Line*, es necesario que las uniones de las líneas que conforman los nodos sean precisas ya que el programa no válida la conectividad entre los mismos, esto traería como consecuencia que se asigne un nodo adicional conformando una red errónea. Luego de terminar el dibujo de la red de fluidos, se carga la aplicación seleccionando en la pestaña *Administración*, el botón *Cargar aplicación*, mostrándose una ventana de exploración de archivo que permite seleccionar la aplicación a ejecutar, en este caso *SimulaciondeRedesdeFluido.dvb*, pulsando el botón *Cargar* y luego *Cerrar*.

Seguidamente, se selecciona en la misma pestaña de *Administración* el botón *Editor de Visual*

Basic y se ejecuta la aplicación cargada pulsando el botón *Ejecutar* o la tecla *F5*, en la pantalla aparece la ventana de la aplicación con las pestañas: *Fluido*, *Nodos*, *Tramos*, *Tuberías*, *Lazos*, *Caudales Externos* y *Solución*.

En la pestaña *Fluido*, se ingresan la densidad en g/cm^3 y la viscosidad absoluta en cP del fluido que circula por la red escribiendo el valor en las respectivas cajas de texto. En la Figura 7, se visualiza a la izquierda el archivo de dibujo con la red de fluidos representada con líneas y a la derecha, la ventana para la introducción de los datos correspondientes.

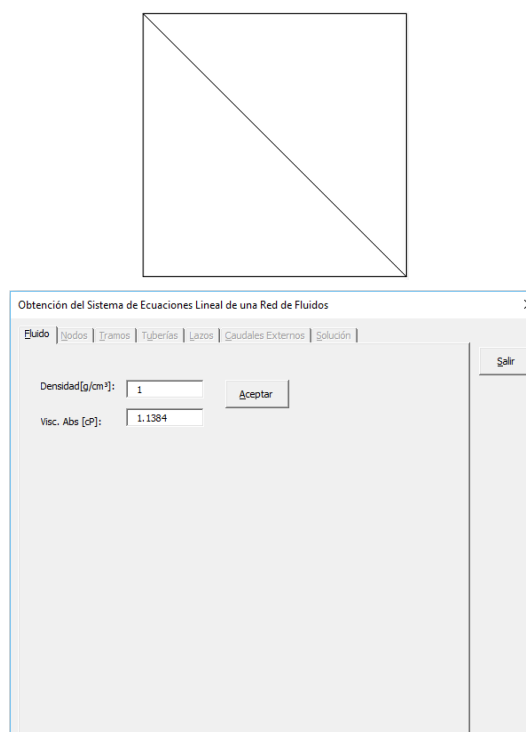


Figura 7: Datos del fluido de la red.

En la pestaña *Nodos* de la Figura 8 se realizan los procedimientos de: detección de los nodos, ordenamiento de las coordenadas de los nodos y la escritura del número del nodo en el dibujo. Así, la Figura 8 muestra una red de fluido que consta de 5 tuberías con coeficientes de fricción de $K1 = 2$, $K2 = 5$, $K3 = 1$, $K4 = 4$, $K5 = 1$; los 4 nodos con sus respectivos caudales externos y 2 lazos, siendo cada procedimiento como se describe a continuación.

Al pulsar el botón *DetectarNodos*, la aplicación extrae de la red dibujada, los identificadores

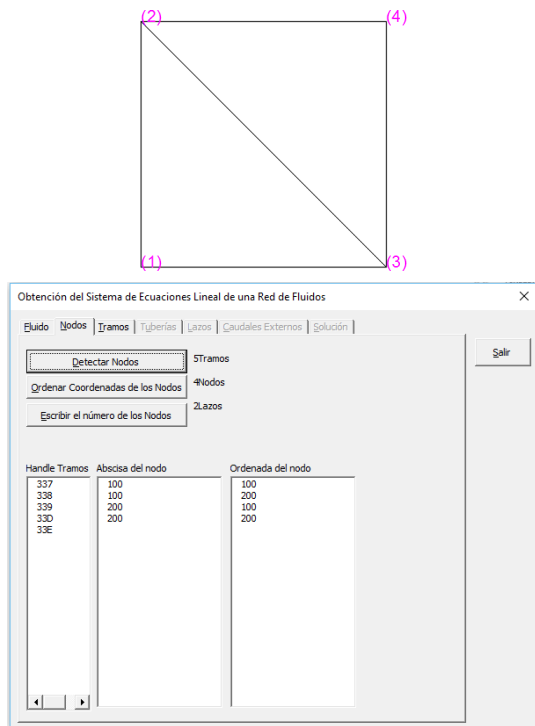


Figura 8: Identificación de los nodos de la red.

(Handle) de los objetos como línea, las coordenadas de sus extremos (nodos) sin repetirlos y la longitud de cada línea la cual se almacena en una matriz denominada *matTuberías*. Por lo tanto, con estos datos el sistema obtiene y muestra por pantalla la cantidad de tramos, nodos y por ende la cantidad de lazos disponibles para crear el sistema de ecuaciones de la red de fluidos.

Luego, mediante el botón *Ordenar Coordenadas de los Nodos*, se ordenan las coordenadas de los nodos con el fin de visualizar de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba la secuencia de la numeración de dichos nodos y con esto tener una mejor visualización de la red y ubicar fácilmente cualquier nodo. El botón *Escribir el Número de los Nodos* crea una capa de nombre *Nodos* y escribe el número entre paréntesis cerca de las coordenadas de dicho nodo según el orden asignado a cada uno de ellos en la red.

En la pestaña *Tramos*, mediante el botón *Ordenar Tramos* se correlaciona el orden de los tramos con el ordenamiento realizado de los nodos y posteriormente con el botón *Escribir el número de los Tramos*, se escribe en el dibujo el número dentro de corchetes que identifica cada tubería de

la red y una flecha que indica la dirección supuesta del flujo (Figura 9).

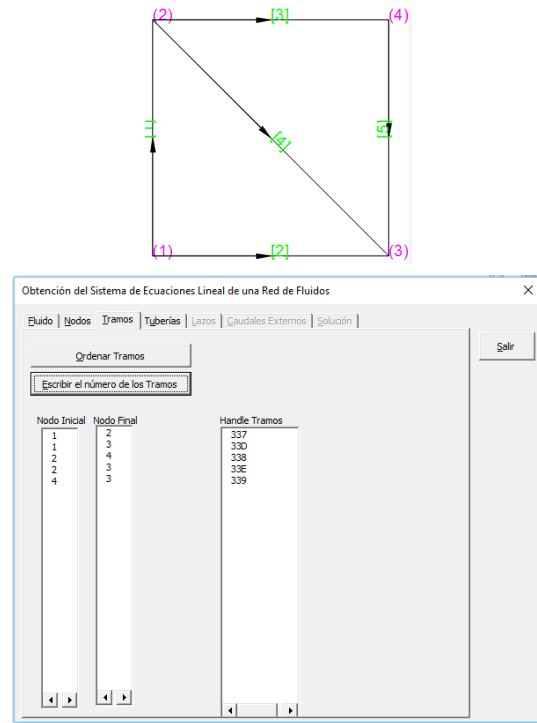


Figura 9: Identificación de los tramos de la red.

La pestaña *Tuberías*, recibe los datos de cada una de ellas. Es posible introducir directamente el factor de fricción o suministrar el diámetro interno de la tubería y la rugosidad para determinar en conjunto con la longitud, el factor de fricción de cada una (Figura 10).

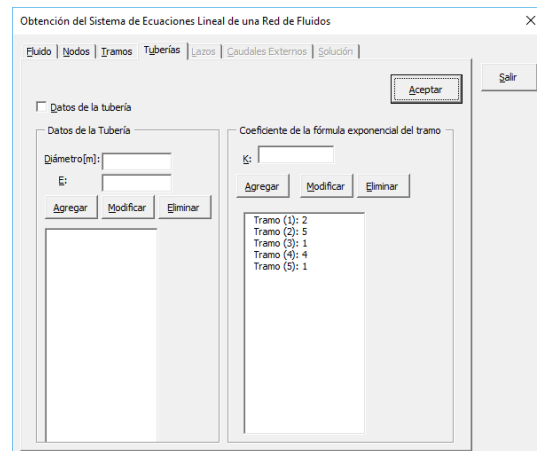


Figura 10: Coeficiente de fricción de la tubería.

Los lazos se definen en la pestaña *Lazos* mediante el botón *Buscar Camino* con un recorrido

en profundidad, de tal manera de obtener todas las trayectorias posibles que forman un lazo cerrado en la red. Finalmente con el botón *Lazos definitivos*, se definen los lazos necesarios y suficientes para completar las ecuaciones requeridas para completar el sistema de ecuaciones representativo de la red de fluidos (Figura 11). Para la red en el centro de la ventana se presenta la lista de adyacencia de los nodos y la cantidad posible de caminos encontrados en total 16.

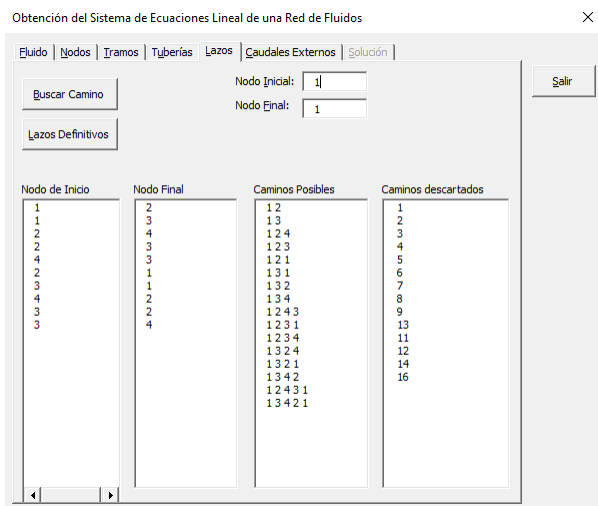


Figura 11: Lazos de la red.

La pestaña *Caudales Externos* solicita los datos referentes al caudal suministrado o extraído en cada uno de los nodos de la red (Figura 12).

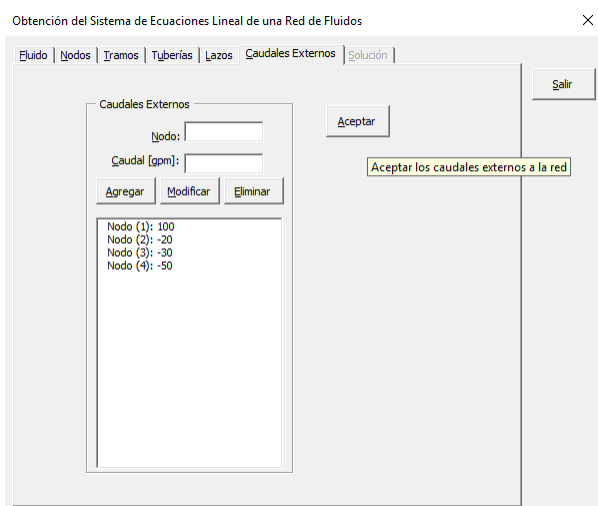


Figura 12: Caudales externos de la red.

En la pestaña *Solución*, finalmente con el botón

Llenar el Sist. Ec. se crea la matriz mediante la obtención de los coeficientes del sistema de la red conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos. Así, en la Tabla 1 se muestra la matriz resultante con los valores obtenidos a través de las respectivas ecuaciones tanto en los nodos como en los lazos de acuerdo al siguiente ejemplo:

Tabla 1: Representación matricial del sistema de ecuaciones de la red (Figura 13).

Ecuaciones	Caudal en [m ³ /h]					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	QE
Continuidad en los nodos	-1	-1	0	0	0	100
	1	0	-1	-1	0	-20
	0	1	0	1	1	-50
Balance de energía en los lazos	-2	5	0	-4	0	0
	-2	5	-1	0	-1	0

El botón *Resolver* (Figura 13), invoca el método teórico lineal utilizando el método de Gauss-Jordan [16] para resolver el sistema de ecuaciones lineal de la red y el botón *Escribir Caudales*, escribe el valor de los caudales en el dibujo obtenidos como resultado de la solución final del sistema de ecuaciones .

En la ventana del programa se presenta, como parte del proceso de resolución de la red, el sistema de ecuaciones lineal inicial y seguidamente los caudales calculados que se obtienen en cada iteración, en la siguiente lista se muestra el resultado final obtenido y la cantidad de iteraciones realizadas según el valor de tolerancia previamente establecido entre los respectivos caudales de cada tramo específico. Una vez calculados los caudales finales mediante el botón *Escribir Caudales* se puede actualizar el dibujo utilizando la capa *Caudales*, con los valores correspondientes a cada tramo o tubería ubicando la información por encima de la línea que representa el mismo, el número del tramo se escribe entre corchetes y al lado se escribe el valor del caudal calculado en las mismas unidades de trabajo utilizadas para el caudal externo.

En consecuencia, si se requiere de un análisis particular, se pueden modificar los parámetros

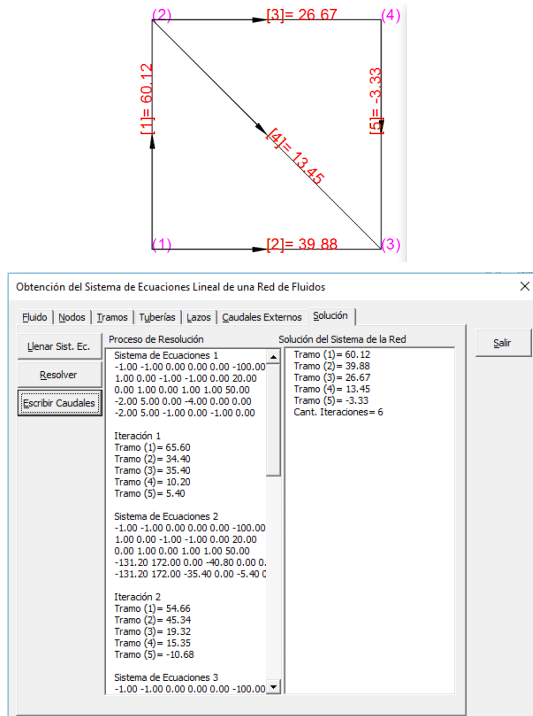


Figura 13: Solución final de la red con los caudales parciales en cada iteración.

correspondientes al fluido, las tuberías o la conformación de la red en el dibujo y calcular los nuevos caudales correspondientes a cada tramo. Esto permite analizar la influencia de los elementos que intervienen en la red sobre la distribución de los caudales finales.

Ejemplo 2. Ampliación de una red

El análisis de la red se realiza partiendo de la técnica de programación mediante una búsqueda en profundidad. En primer lugar se necesita conocer cuál es el conjunto de conexiones existentes entre las tuberías que conforman la red; por ejemplo, en una red sencilla de tres tuberías tal como se muestra en la Figura 14, se tiene el flujo externo en los nodos 1, 2 y 3 con valores de 100, -30 y -70 [m³/h] respectivamente, el valor positivo indica que el flujo entra a la red y el valor negativo que sale de la misma.

A partir del dibujo de la red inicial (Figura 14), el programa audita la base de datos del archivo de dibujo, determinando las coordenadas del punto de inicio y fin de las líneas, estos van a representar los nodos de la red; y los segmentos de línea

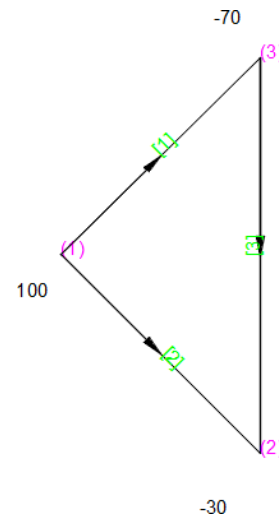


Figura 14: Red de tres tramos y tres nodos.

representan las tuberías. El sentido en que fue dibujada cada línea define el sentido de flujo supuesto en ese tramo (Tabla 2).

En el programa se identifica y enumera las tuberías de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba, utilizando como dato principal las coordenadas del punto de inicio o final, cualquiera de los dos que este más a la izquierda. De manera similar, se identifican y enumeran los nodos, conformados por el conjunto de uniones entre las líneas; es decir, donde coinciden puntos extremos de las líneas. Las características del fluido y de cada una de las tuberías deben ingresarse a través de la interfaz de la aplicación.

Tabla 2: Tabla de identificación de nodos y tramos de la red (Figura 14).

Nodos Iniciales	Nodos Finales	Tramos
(1)	(3)	[1]
(1)	(2)	[2]
(3)	(2)	[3]

Los valores del coeficiente de pérdida para las tuberías del ejemplo 2 son: $K1 = 1$, $K2 = 2$, $K3 = 1$; estos valores se introducen en el software en la pestaña *Tuberías*.

Por último, una vez que el programa determina la topología de la red, crea una matriz cuyo contenido son los coeficientes de las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía

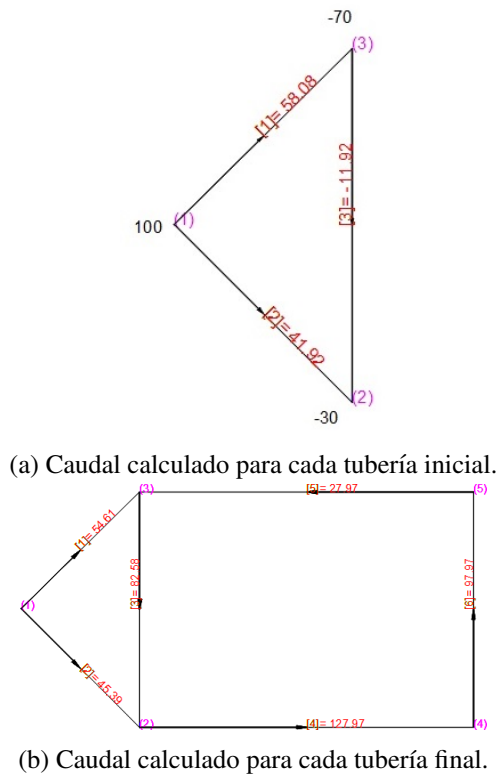


Figura 15: Caudal calculado.

en los lazos, finalmente resuelve los sistemas de ecuaciones necesarios mediante la aplicación del método teórico lineal; el resultado de este procedimiento permite obtener el valor del caudal de cada tubería de la red, quedando reflejados dichos en la Figura 15(a) para cada tubería para cada tubería.

El archivo de dibujo puede ser editable, si no se cuenta con el archivo original; basta con borrar el texto de la enumeración de los tramos, de los nodos y el valor de caudal de las capas de dibujo respectivas, hasta tener solamente el conjunto de líneas que conforman la red, luego de modificar la red o los datos de la misma se pueden calcular los nuevos valores mediante el procedimiento descrito en la metodología. Por ejemplo, si se amplía la red anterior, se logran obtener resultados como los mostrados en la Figura 15(b).

En resumen el programa detecta de un dibujo en AutoCAD que representa una red de fluido cerrada, los elementos necesarios para conformar el sistema de ecuaciones lineal que representa la red y calcular con el método teórico lineal los

caudales en todos los tramos. Los coeficientes de las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos se almacenan en una matriz como resultado del reconocimiento de las líneas en el dibujo y la secuencia como están conectadas, además de la introducción de los datos del fluido y de las tuberías. Todos los datos suministrados pueden ser modificados e inclusive el diseño de la red y obtener los nuevos resultados producto de dichas modificaciones. En cuanto al sentido de flujo de los caudales finales, un valor negativo indica que el fluido recorre en dirección contraria a la supuesta inicialmente.

5. Conclusiones.

El programa diseñado detecta los nodos y los tramos de una red cerrada dibujada en base a las coordenadas rectangulares de las líneas dibujadas en un archivo de CAD. Por medio de la estructura de dicho archivo crea un orden para la mejor visualización de los nodos y tramos de la red. Permitiendo que se pueda trabajar en conjunto con aplicaciones actuales como *Google Earth* para la obtención de datos geográficos de lugares y se dibuje la red a partir de dicha información.

El software desarrollado facilita el análisis de la red, realizando modificaciones de valores a los datos del fluido, de la tubería, de la topología de la red y de los caudales externos, permitiendo de esta manera poder realizar de manera didáctica un estudio más rápido y detallado de la red dibujada.

El programa es una propuesta de apoyo en la resolución de redes de fluidos malladas mediante el método de la teoría lineal, que muestra cada etapa de resolución de la red de fluido con la intención de presentar de manera intuitiva todos los pasos para la comprensión y análisis en el estudio del tema.

Mediante el subprograma del método de Gauss-Jordan para sistemas de ecuaciones, se resuelven los sistemas de ecuaciones lineales de la red conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos, con lo cual se dispone de una herramienta para su aplicación en la resolución de ejercicios.

En este trabajo no se incluye el estudio de acercamiento entre nodos de diferentes tramos debido a que AutoCAD ofrece herramientas de precisión para la unión de líneas en la edición del dibujo; sin embargo, se plantea su inclusión para trabajos futuros que verifiquen la correcta conformación de una red de fluidos, adicionalmente se sugiere agregar la resolución de redes de fluido abiertas y la incorporación de bombas, tanques y accesorios a la red. Igualmente en futuras investigaciones se debe evaluar el comportamiento de la herramienta en lo referente al manejo de caudales con magnitudes extremas, con respecto al valor de la tolerancia de cálculo utilizada para la estimación y convergencia de toda la red.

Para finalizar, el programa selecciona de las ecuaciones de lazo, los caminos de menor recorrido, en trabajos futuros se continuará con el análisis de la selección de diferentes caminos para evaluar la rapidez y la exactitud en la resolución de la red.

Referencias

- [1] R. Pérez. *Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua en redes ramificadas considerando los elementos de regulación*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1993.
- [2] AutoCAD 2015 Autodesk. *AutoCAD 2015: Complete Guide to What's New*. Autodesk, Inc., USA, 2015.
- [3] José Gamboa, J. García y R. Méndez. Desarrollo de un método para la solución de sistemas de tuberías abiertas. *Ingeniería*, 8(3):7–14, 2004.
- [4] Jesica Rivero. *Búsqueda rápida de caminos en grafos de alta cardinalidad estáticos y dinámicos*. Tesis de Doctorado, Departamento de Informática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2011.
- [5] J. Valls y D. Camacho. *Programación estructurada y algoritmos en Pascal*. Pearson Educación, Madrid, España, 2004.
- [6] Autodesk. *AutoCAD 2010. Manual de personalización*. Autodesk, Inc., California, EEUU, 2009.
- [7] Diana Santiváñez. Desarrollo de un software para cálculos hidráulicos de redes de tuberías con fluidos monofásicos. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2013.
- [8] Denis Montalbán. Respuesta transitoria del flujo al cierre de una válvula en una red de tuberías un enfoque numérico y experimental. Tesis de Maestría, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2004.
- [9] Yunus Çengel y J. Cimbala. *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, cuarta edición, 2012.
- [10] Bruce Munson, A. Rothmayer, T. Okiishi, and W. Huebsch. *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley, 6th edition, 2009.
- [11] R. Mott. *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación, México, sexta edición, 2006.
- [12] R. Giles, J. Evett y C. Liu. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. McGraw Hill, México, tercera edición, 1994.
- [13] J. Saldarriaga. *Hidráulicas de tuberías*. McGraw Hill Interamericana, S. A., Colombia, 1998.
- [14] L. Ambrosius. *AutoCAD Platform Customization: User Interface, AutoLISP, VBA, and Beyond*. Wiley, Indianapolis, 2015.
- [15] L. Joyanes y I. Zahonero. *Estructura de datos en Java*. McGraw-Hill, Interamericana de España, S. A. U., España, 2008.
- [16] Steven Chapra y R. Canale. *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., México, sexta edición, 2011.

Development of a software to obtain a system of linear equations from a vectorized fluid network.

A. Bolívar*, A. Almarza

Departamento de Computación, Estudios básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

Analysis of fluid networks constitutes a case of study of greater importance and impact from the point of view of engineering, in which are involved sequences of iterative calculations which usually have some complexity. In this sense, it was developed a software to obtain the system of equations corresponding to a network of distribution of fluid from its respective drawing into Computer Aided Design (CAD) and the corresponding solution, using the linear theoretical method to obtain the flow that circulates through each pipe. This method shows a very rapid convergence and presents a great advantage over other methods of calculation, such as Hardy-Cross and Newton, since it does not require initialization of flow for each pipe. The network is drawn in CAD using lines, and the software is responsible to form automatically the system of equations, formed by the equations of continuity on nodes and balance of energy in loops, allowing user to supply characteristics of the fluid and pipe. The supplied network may be modified in the drawing and the program calculates the new distribution of flow.

Keywords: software; fluid; pipe networks; linear theory method; CAD.

Desarrollo de un software para la obtención del sistema de ecuaciones lineales de una red de fluido vectorizada.

Resumen.-

El análisis de las redes de fluido constituye una de las situaciones de estudio de mayor importancia e impacto desde el punto de vista de ingeniería, en donde se involucran secuencias de cálculos iterativos que suelen tener cierto grado de complejidad. En este sentido, se desarrolló un software que permite en primer lugar obtener el sistema de ecuaciones correspondiente a una red de distribución de fluido a partir de su respectivo dibujo en Diseño Asistido por Computadora, CAD por sus siglas en inglés y la solución correspondiente, empleando el método teórico lineal para obtener el caudal que circula por cada tubería. Este método muestra una convergencia muy rápida y presenta una gran ventaja sobre otros métodos de cálculo, como Hardy-Cross y Newton, ya que no requiere la inicialización de caudal para cada tubería. La red se dibuja en CAD mediante líneas, y el software se encarga de formar automáticamente el sistema de ecuaciones inicial, conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos, permitiendo que el usuario suministre las características del fluido y de las tuberías. La red suministrada puede ser modificada en el dibujo y el programa calcula la nueva distribución de caudal.

Palabras clave: software; fluido; redes de tuberías; método teórico lineal; CAD.

Recibido: Junio 2015

Aceptado: Marzo 2016

1. Introducción.

En las redes de distribución de fluido resulta necesario evaluar las condiciones de operación tanto en una red nueva, así como en otras en las que se hagan modificaciones, tales como cambio

*Autor para correspondencia

Correo-e: abolivar@uc.edu.ve (A. Bolívar)

de accesorios, válvulas o extensiones de los tramos de tubería, teniendo como premisa que la red puede presentar diversas disposiciones o arreglos según las conexiones con accesorios tipo ‘Y’, ‘T’ y cruz entre otros; los cuales permiten dirigir el fluido a un lugar determinado y con condiciones particulares de disponibilidad y caudal; además de tener en cuenta que, con el paso del tiempo, se produce el envejecimiento de las tuberías y obstrucciones que afectan su funcionamiento y que en muchos casos obliga a modificar la red, agregando o eliminando tramos de tuberías y accesorios. En tal sentido, frente al carácter, sí se quiere dinámico, de este tipo de sistemas, se plantea la necesidad de efectuar con frecuencia los cálculos pertinentes para determinar el caudal de fluido que circula por cada tubería, de esta manera, con la intención de permitir que ese proceso de evaluación sea realizado de una forma más sencilla y expedita, se ha desarrollado un software tomando como punto de partida el fluido circulante, las características de las tuberías y los caudales externos a la red.

El programa diseñado, analiza e interpreta la red dibujada en un archivo de dibujo asistido por computadora (CAD), el cual se utiliza ampliamente en el mundo con fines de edición de dibujos y combina la digitalización de la red con la programación de rutinas para la detección, análisis y el cálculo de la red de fluidos a través del módulo de programación con Visual Basic Application (VBA) en AutoCAD 2015. Lo cual constituye un valor agregado con respecto a otros programas como EPANET y EpaCAD, en los que se desarrollan elaboradas ventanas para la introducción de datos de la red o graficadores particulares para dibujarla.

Así, el trabajo se centra en el desarrollo de un programa que permite obtener el sistema de ecuaciones de una red de fluido cerrada previamente dibujada en CAD, y su solución mediante el método teórico lineal que tiene entre sus ventajas, la forma más sencilla de realizar el cálculo iterativo, que consiste en utilizar los caudales obtenidos en la resolución del sistema linealizado de ecuaciones en una iteración para calcular los nuevos coeficientes que se utilizarán

en la iteración siguiente [1].

Para la consecución de este fin se desarrolló:

- Un subprograma para reconocer los nodos y los tramos en una red cerrada dibujada en base a líneas en un archivo de dibujo en CAD.
- El subprograma para el ordenamiento y enumeración de los nodos y lazos de la red.
- Un subprograma para crear la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones de la red, conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos de dicha red.
- Un subprograma para aplicar el método teórico lineal debido a que este método no requiere la suposición previa de caudales en cada tramo.

2. Marco teórico

El uso de las aplicaciones CAD es muy extenso tanto a pequeña como a gran escala, el diseño de casas, edificios, conjuntos residenciales e inclusive poblaciones se puede digitalizar y tener disponible para la implementación de aplicaciones como la desarrollada en este estudio, inclusive se pueden obtener de otras aplicaciones como Google Earth las distribuciones geográficas necesarias para la elaboración de la red de fluido [2].

Las aplicaciones como Mathcad pueden ser utilizadas para implementar métodos de resolución de sistemas de tuberías abiertas como estrategia didáctica en el aprendizaje del tema, lo cual adicionalmente agiliza el procedimiento de análisis hidráulico. Similarmente se han desarrollado software tanto comerciales (WaterCAD, AFT Fathom, CivilCAD, Cadpipe, entre otros) como de investigación (EpaCAD, EPANET y otros de universidades e institutos) que permiten por un lado dibujar la red, convertirla a un fichero interpretable por algún simulador, o simular dinámicamente el comportamiento hidráulico, siendo estos elementos los claves que son tomados en consideración para su aplicación de manera integrada en el diseño del software [3].

2.1. Algoritmo de Búsqueda en Profundidad

La idea general detrás de una búsqueda en profundidad comienza fijando como nodo actual al nodo de inicio combinándolo con una pila vacía en la cual se irá guardando los nodos visitados. En cada paso se toma como nodo actual a un nodo adyacente o vecino que no esté en la pila y se insertará en la misma. Al llegar a un nodo sin nodos adyacentes que no estén en la pila, se volverá al nodo anterior que se encuentra ubicado en la cima de la pila. Si se alcanza el nodo destino, se tendrá una solución posible en la pila, además puede operarse como si éste fuera un nodo infructuoso a fin de realizar una búsqueda exhaustiva que ofrezca la solución óptima, o todas las soluciones posibles (cuando esto es necesario) [4]. En el programa desarrollado, el retroceso se logra usando una lista que almacena los vértices iniciales de futuros caminos posibles. También se realiza una búsqueda que indica el estado actual de cualquier vértice, de modo que ningún vértice sea procesado más de una vez.

2.2. Microsoft Visual Basic para Aplicaciones (VBA).

Desde el punto de vista de programación, se combinan dos paradigmas refiriéndose en primer lugar a programación estructurada para el diseño de las subrutinas de cálculo y su posterior ejecución secuencial y el paradigma de programación orientada a objetos que permite el manejo de los atributos y propiedades de cada componente de la red de fluidos dibujada en CAD y utiliza conceptos como la abstracción de datos, la encapsulación de la información, la herencia y el polimorfismo [5]. En lo referente a la programación orientada a objetos, se controla a través de manejo de eventos, donde el usuario realiza acciones sobre dichos objetos. Según el objeto y la acción de que se trate se ejecutará la rutina asociada. Las aplicaciones contienen una colección de bloques de instrucciones a los que se denomina procedimientos, que se pueden agrupar en módulos [6].

Gracias al entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment, IDE), VBA permite desarrollar aplicaciones con gran rapidez, controlando, desde la propia etapa de diseño, el

ambiente de las diversas ventanas del programa. Además, Visual Basic es un lenguaje muy fácil de aprender y utilizar.

La programación con VBA en AutoCAD viene definida por tres elementos esenciales. El primero de ellos es AutoCAD, que dispone de un extenso conjunto de objetos entre los que se incluyen entidades, datos y comandos de AutoCAD. AutoCAD es una aplicación de arquitectura abierta con varios niveles de interfaz. Para utilizar VBA de manera eficaz, es recomendable estar familiarizado con la programación en AutoCAD.

El segundo elemento es la interfaz AutoCAD ActiveX Automation, que intercambia mensajes (establece una comunicación) con los objetos de AutoCAD. La programación en VBA requiere comprender los fundamentos de ActiveX Automation. El tercer elemento que define la programación en este entorno es VBA. Incluye su propio conjunto de objetos, palabras clave, constantes, etc., que proporcionan el flujo de programación y funciones de control, limpieza y ejecución. AutoCAD VBA incluye un sistema de ayuda propio de Microsoft para AutoCAD VBA.

Los programas, macros y proyectos de VBA se almacenan en un archivo independiente con la extensión .dvb, debido a esto un proyecto de VBA puede operar sobre diferentes dibujos de AutoCAD durante una sesión de este programa. Para cargar un proyecto de VBA debe utilizar el comando VBACARGAR. Una vez cargado, sus módulos y macros estarán disponibles en el cuadro de diálogo Macros. Para ejecutar el módulo VBA debe utilizar el comando VBAEJECUTAR.

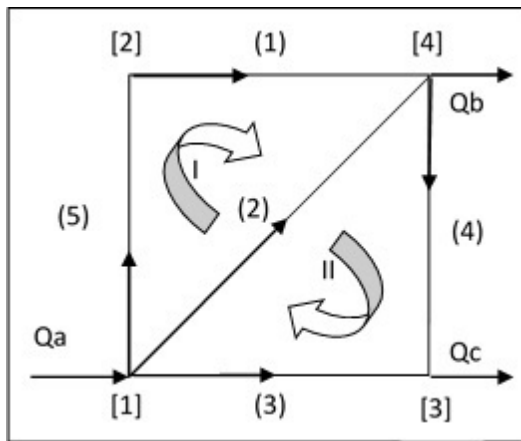
2.3. Redes de Tuberías.

Las redes de tuberías pueden ser abiertas, cerradas y mixtas; y son sistemas de distribución de fluidos que están constituidos por tramos de tuberías, puntos de toma y descarga de fluido [7]. Un tramo es una tubería que une dos nodos, un nodo es un punto de confluencia de las tuberías o de empalme con tanques externos, y un lazo es el conjunto de tramos que forman un circuito cerrado.

Cuando los sistemas se hacen complejos, la solución de la red mediante gráficas es muy

complicada, por lo tanto se recurre a buscar una solución numérica computacional. Para evaluar una red de tuberías, se debe garantizar que se cumplan las ecuaciones de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de esta.

La búsqueda en profundidad permite en gran parte resolver el problema de distribución de fluidos, su objetivo principal en este programa consiste en determinar la conexión entre los nodos (punto de confluencia de las tuberías) y buscar los diferentes caminos para la conformación de lazos. Esto facilita la aplicación de las ecuaciones de continuidad en los nodos y las ecuaciones de balance de energía en los lazos de la red de distribución. En la red de distribución de fluido (Figura 1) se establece un sentido de recorrido del lazo de forma horaria, y según este sentido, la pérdida en la tubería se considera negativa cuando el caudal recorre el circuito en el mismo sentido y positivo en caso contrario.



[]: Nodos (): Tramos I, II: Lazos
 Qa, Qb, Qc: Caudales externos
 ⤷: indica el sentido

Figura 1: Red de distribución de fluido.

En una red de tuberías cerrada que presenta “N” tuberías, con “J” nodos y “L” lazos se debe cumplir la ecuación (1).

$$N = (J - 1) + L \tag{1}$$

donde:

N: Cantidad de ecuaciones independientes del sistema.

(J - 1): Cantidad de ecuaciones de continuidad independientes, las cuales son lineales en Q (caudal).

L: Cantidad de lazos necesarios para completar el sistema de ecuaciones.

En las redes de fluidos se cumplen dos leyes similares a las de Kirchoff para sistemas eléctricos, las cuales son [8]:

1. La suma de los caudales que llegan a un nodo dado es igual a la suma de los caudales que salen de dicho nodo. (esta es una forma de enunciar la Ley de Continuidad).
2. La suma algebraica de las pérdidas de carga en un circuito cerrado de una red debe ser nula. (este es un balance energético que se debe realizar en cada malla o circuito).

Ambas leyes se cumplen bajo el supuesto de que las variables no dependen del tiempo (estado estacionario).

Para cada nodo de la red se debe cumplir la ecuación (2).

$$Q_{externo} + \sum (Q_i)_{entra} - \sum (Q_i)_{sale} = 0 \tag{2}$$

donde:

Q_{externo}: Caudal externo a la red en el nodo, [m³/h].

Q_{i_entrada}: Caudales que entran al nodo, [m³/h].

Q_{i_salida}: Caudales que salen del nodo, [m³/h].

Existen L ecuaciones independientes de balance de energía en cada lazo, las cuales en general no son lineales en Q.

Para un lazo en particular se cumple la ecuación (3).

$$\sum hi = \sum ki Qi^n = 0 \tag{3}$$

donde:

i: Número identificador de la tubería.

h: Pérdida por fricción en la tubería, [m].

k: Coeficiente de fricción de la tubería, adimensional.

Q: Caudal que circula en la tubería [m³/h].

n: exponente que depende del modelo utilizado para evaluar hi (el modelo de Darcy [9] utiliza n = 2).

Al plantear las relaciones mencionadas se crea un sistema de ecuaciones, en el que se puede observar que el número de ecuaciones disponibles coincide con el número de incógnitas (caudal por cada tramo). En redes de flujo complejas, el número de ecuaciones resultante puede ser grande, por lo que la solución simultánea amerita generalmente el uso de un computador.

2.4. Pérdidas por fricción en tuberías.

El modelo básico para el cálculo de pérdida por fricción en las tuberías es el de Darcy-Weisbach y se expresa en la ecuación (4).

$$h = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (4)$$

donde:

h : Pérdida de carga [m].

f : Coeficiente de fricción de la tubería, adimensional.

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro interno de la tubería [m].

$\frac{V^2}{2g}$: Altura de velocidad [m].

g : Aceleración de gravedad $9,81m/s^2$.

2.5. Coeficiente de fricción.

La determinación del coeficiente de fricción dependerá del régimen de flujo existente. Así, para el régimen laminar que implica un número de Reynolds menor o igual a 2000 ($Re \leq 2000$), en tuberías circulares lisas o rugosas y para cualquier fluido incompresible, se tiene un comportamiento como el mostrado en la ecuación (5), desarrollado por Hagen-Poiseuille [9, 10, 11, 12].

$$f = 64/Re \quad (5)$$

En el caso de régimen turbulento ($Re > 2000$), se emplea la aproximación de Steffenson, expresada mediante la ecuación (6).

$$f = \left(A - \frac{(B - A)^2}{C - 2B + A} \right)^{-2} \quad (6)$$

Siendo el comportamiento de los parámetros A, B y C, los que se muestran en las ecuaciones (7),

(8) y (9) respectivamente, estimado el número de Reynolds según la ecuación (10).

$$A = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{12}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (7)$$

$$B = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{2,51A}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (8)$$

$$C = \frac{-2 \log \left(\frac{\epsilon}{D3,7} + \frac{2,51B}{Re} \right)}{\log(10)} \quad (9)$$

$$Re = \frac{Q\rho 277777,78}{D\nu} \quad (10)$$

donde:

Re : Número de Reynolds, adimensional.

Q : Caudal [m^3/h].

ρ : Densidad [g/cm^3].

ν : Viscosidad cinemática [cP].

D : Diámetro interno de la tubería [mm].

ϵ : Rugosidad relativa [mm].

Con el valor del factor de fricción (f), se determina el coeficiente de fricción (Kf) de la tubería como se indica en la ecuación (11).

$$Kf = \frac{fL1000}{D} \quad (11)$$

donde:

f : Factor de fricción, adimensional.

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro interno de la tubería [mm].

2.6. Método Teórico Lineal.

Este método fue desarrollado por D. J. Woody y C. O. A. Charles, y se basa en la linealización de las ecuaciones de energía en cada una de las tuberías de la red con el fin de resolver simultáneamente las ecuaciones de la conservación de masa en los nodos y de energía en los circuitos, para determinar el caudal en cada tubería, el método ofrece dos ventajas importantes [7, 13]:

- No requiere suponer una distribución inicial de caudales en cada tramo.

- Converge rápidamente a la solución en pocas iteraciones.

La base del método consiste en la transformación lineal de las ecuaciones de pérdida como lo muestra la ecuación (12).

$$hi = kiQi^n = (kiQi_{(i-1)}^{n-1})Qi = ki' Qi \quad (12)$$

donde:

$ki' = (kiQi_{(i-1)}^{n-1})$ [adimensional]

$Qi_{(i-1)}$: Caudal tentativo que circula en el tramo 'i' para la iteración '(i-1)' en $[m^3/h]$

La solución se obtiene cuando $Qi_{(i-1)}$ se aproxima a Qi de acuerdo a algún criterio de error preestablecido.

La convergencia hacia la solución se realiza mediante un proceso iterativo que se inicia haciendo $ki' = ki$. Esto equivale a fijar un caudal unitario de cada uno de los tramos; es decir, $Qi_{(0)} = 1$.

Para evitar la oscilación en torno a la solución final, se recomienda que después de resolver dos iteraciones consecutivas: $Qi_{(n-1)}$ y $Qi_{(n-2)}$, se proceda a obtener un caudal promedio para la iteración 'n' ($Qi_{(n)}$) como lo presenta la ecuación (13).

$$Qi_{(n)} = \frac{(Qi_{(n-1)} + Qi_{(n-2)})}{2} [m^3/h] \quad (13)$$

3. Metodología.

A continuación se exponen las instrucciones ejecutadas en cada una de las etapas del proceso de obtención del sistema de ecuaciones lineal a partir del dibujo de una red de fluidos en CAD y la resolución que permite determinar los caudales que circulan por cada tramo de la red.

3.1. Aspectos computacionales para la detección de objetos en AutoCAD® mediante VBAapplication.

La codificación en Visual Basic Application (VBA) para AutoCAD 2015 permite recorrer en el archivo de dibujo activo todos los objetos que contiene, esto se puede hacer mediante la implementación de un ciclo [14] como se muestra en la Figura 2.

```
For Each entry In ThisDrawing.ModelSpace
...
Next
```

Figura 2: Estructura cíclica para recorrer por todos los objetos del dibujo.

```
If entry.ObjectName="AcDbLine"Then
...
End If
```

Figura 3: Estructura condicional para detectar si el objeto es una línea.

En este trabajo se necesita detectar cuales objetos son líneas mediante la condición que se muestra en la Figura 3.

Se puede obtener de cada una de estas líneas las coordenadas de los extremos con la instrucción de la Figura 4.

```
a=entry.startPoint 'devuelve el punto inicial de la línea'
b=entry.endPoint 'devuelve el punto final de la línea'
```

Figura 4: Instrucciones para almacenar las coordenadas de los puntos extremos de una línea.

Estas coordenadas se deben almacenar en variables de tipo *Variant*, las cuales se manejan posteriormente como un vector de tal manera que si se almacena un punto inicial mediante la instrucción $a = entry.startPoint$, la abscisa se obtiene con $a(0)$ y la ordenada con $a(1)$. Adicionalmente, se pueden obtener otros datos como la longitud de la línea y su identificador mediante los métodos $entry.Length$ y $entry.Handle$.

3.2. Datos de entrada.

Los datos de entrada corresponden a todas aquellas variables necesarias provenientes del archivo de dibujo, fluido, tuberías y nodos para resolver la red de fluido. En esta aplicación los datos de entrada son captados en diferentes pestañas: Fluidos, Tuberías y Caudales Externos:

- La red es dibujada mediante el comando Línea representando un tramo de tubería en un archivo de extensión .dwg, estas líneas

deben estar debidamente conectadas entre sí en los extremos para formar la red de tuberías.

- Se carga el programa VBA para AutoCAD y se ejecuta.
- Al cargar el programa, del dibujo se obtiene automáticamente el número de nodos y de tuberías, de las cuales se deduce la cantidad de lazos.
- En la Figura 7 se tiene las propiedades del fluido (pestaña *Fluido*), densidad [g/cm^3] y viscosidad cinemática [cP].
- En la Figura 10 se tiene los datos de las tuberías (pestaña *Tuberías*), en la cual se introduce el valor del coeficiente de fricción directamente o el diámetro interno [m] y la rugosidad, la longitud se obtiene del dibujo.
- En la Figura 12 (pestaña *Caudales Externos*), se ingresa el caudal externo [m^3/h] y su respectivo número del nodo.

3.3. Detección de nodos.

A partir del archivo de dibujo previamente elaborado, se procede a analizar la red de fluido mediante un programa en VBA para AutoCAD.

En primer lugar se obtienen las coordenadas de los puntos extremos (nodos) de todas las líneas dibujadas (*tramos*) en el dibujo activo, adicionalmente se guarda en el arreglo de datos de las tuberías su longitud, en caso de necesitarse para calcular el coeficiente de la tubería. Las coordenadas de los nodos son almacenadas en dos listas las cuales contienen por separado la abscisa y la ordenada, sin repetirse. Adicionalmente se almacenan en una lista los manejadores (*handle*) de cada una de las líneas encontradas.

Una vez que se obtienen las coordenadas de todos los nodos, dicha cantidad de elementos representa la cantidad de nodos de la red de fluido y la cantidad de elementos en la lista de manejadores es la cantidad de tramos, con estos dos datos se calcula, mediante la ecuación (1), la cantidad de lazos necesarios para crear el sistema de ecuaciones para la solución de la red.

En el caso de estudio, en el cual no existe restricción con respecto al sentido de flujo, una tubería puede presentar dos sentidos de flujo, por ejemplo entre los nodos 1 y 2 de una tubería, el fluido puede circular de 1 a 2 o viceversa, esto conlleva a realizar todas las combinaciones posibles para obtener los caminos de los lazos. Para efectos de la asignación inicial del sentido de flujo, éste depende del punto inicial y del punto final almacenado en la base de datos del dibujo.

3.4. Ordenamiento de los nodos y tramos.

Los nodos se ordenan de acuerdo a las listas de coordenadas, primeramente se ordena la lista de abscisas y luego las ordenadas utilizando el método de ordenamiento *quicksort* debido al volumen de datos que deben organizarse [15] recibiendo como parámetros: el arreglo a ordenar, la posición inicial, final y la columna de los elementos a ordenar, el orden se realiza en forma ascendente por lo tanto las coordenadas se ordenan de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. Luego de ordenar las listas de coordenadas se procede a escribir el número de cada nodo en el archivo de dibujo.

El ordenamiento de tramos se realiza recorriendo la lista de abscisa y se busca en la lista de líneas; una vez encontrada se almacena en otra lista en el orden en que se encuentran, esto asegura que el orden de enumeración sea de izquierda a derecha y en lo posible de abajo hacia arriba y finalmente se escribe el número a cada tramo en el archivo de dibujo.

3.5. Detección de los posibles lazos mediante una búsqueda en profundidad.

Inicialmente, se listan en un arreglo bidimensional los nodos conectados al nodo inicial (Figura 5). El arreglo inicial tiene una cantidad de filas igual a la cantidad de tramos denotados por la unión del nodo inicial y el nodo final, dicho arreglo se incrementa en la unidad a medida que se consiguen los caminos posibles para formar un lazo, los caminos que no forman un lazo son descartados.

En el arreglo inicial, cada fila corresponde a los nodos adyacentes al nodo inicial del lazo,

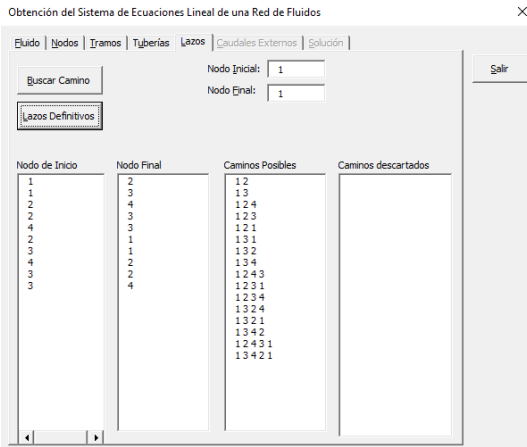


Figura 5: Etapas para la determinación de los lazos.

seguidamente se toma el nodo ubicado en la primera fila, segunda columna correspondiente al primer nodo adyacente, para determinar los diferentes caminos a partir de este tramo y que puedan formar un lazo.

El nodo seleccionado representa el punto de inicio de la búsqueda en profundidad, el mismo se busca en el arreglo de conexiones de nodo, si se encuentra entonces es un nodo tentativo a formar un camino. El nodo tentativo se busca en el camino ya recorrido, si no es encontrado, se agrega una fila y una columna a la matriz y se copia el nodo tentativo en esta última fila y última columna creada en este instante. En las celdas anteriores se escriben los nodos recorridos para formar el nuevo camino. Finalmente se pasa a la siguiente fila y así sucesivamente hasta que se generen todos los caminos posibles (Figura 5), que representa los datos de la red en la discusión de resultados de la Figura 9.

3.6. Generación de lazos.

La siguiente etapa es buscar los lazos definitivos que formarán parte del sistema de ecuaciones, para ello se busca en la matriz de caminos posible, aquellos que cumplan las siguientes condiciones de lazo:

- El camino tiene 4 nodos o más.
- El camino inicia y finaliza en el mismo nodo (lazo cerrado).

- El camino recorre la menor cantidad de tramos posibles.

Para cada camino se cuentan los nodos que contiene y se verifica que el último nodo corresponda con el nodo final requerido. Al encontrar un camino que forme un lazo, se busca en los caminos restantes cual tiene el mismo recorrido y se procede a descartarlo, de manera similar el resto de los caminos se revisan hasta obtener la cantidad de lazos necesarios para formar el sistema de ecuaciones.

3.7. Creación del sistema de ecuaciones.

Los valores del coeficiente de resistencia para cada tubería se introducen como datos por teclado en la pestaña *Tuberías* del programa (Figura 10), con éstos se crea el sistema inicial de ecuaciones; los valores de los caudales externos también se introducen a través de la interfaz. El sistema de ecuaciones está conformado por $(J - 1)$ ecuaciones de continuidad en los nodos y (L) ecuaciones de balance de energía en los lazos.

El sistema de ecuaciones se forma aplicando la ley de nodos y la ley de lazos, primeramente se busca en la lista de nodos la dirección de flujo en cada nodo, si el flujo sale del nodo se escribe -1 en el arreglo en la celda correspondiente a la posición en la que se encuentre en la lista, y en caso contrario si entra el flujo al nodo se escribe +1 en dicha posición (Figura 13).

Posteriormente aplicando la ley de lazos se escriben los valores del coeficiente de fricción del tramo respectivo, para ello se recorre la matriz de lazos y adicionalmente se ubica el índice del tramo respectivo lo que va a permitir el acceso a la lista de coeficientes, si el flujo en el tramo tiene el mismo sentido del recorrido del lazo entonces es negativo de lo contrario es positivo.

Para la aplicación del método teórico lineal se requiere la solución del sistema de ecuaciones hasta que se cumpla con el criterio de error establecido. Los valores obtenidos como resultado de la resolución del sistema de ecuaciones final [16], representa el caudal que circula por cada tramo, se debe tomar en cuenta que si algún valor es negativo, significa que la dirección de flujo es en sentido contrario al supuesto inicialmente.

3.8. Resultados.

Los caudales obtenidos en este programa son escritos en el archivo de dibujo en una capa denominada Caudales mediante la instrucción de la Figura 6.

```
SettextObj=ThisDrawing.ModelSpace.AddText(texto,ptm,5)
textObj.Layer="Caudales"
```

Figura 6: Creación de texto en la capa Caudales.

La ubicación del texto es lo más cercano a cada una de las líneas correspondientes a las tuberías de la red para tener una mejor visibilidad del comportamiento de esta. En el caso de ejecutar nuevamente la aplicación con valores diferentes, para evitar sobrescribir los resultados, se debe proceder a borrar previamente los caudales y direcciones de flujo determinadas en el cálculo anterior, procediéndose de igual manera sí se desea modificar la red, eliminando o agregando otras líneas.

4. Presentación, análisis y discusión de resultados.

Ejemplo 1. Procedimiento de cálculo.

La secuencia de introducción de datos, su procesamiento e impresión de resultados, se desarrolla de la siguiente manera.

Inicialmente, se digitaliza en CAD la red de fluidos mediante el comando *Line*, es necesario que las uniones de las líneas que conforman los nodos sean precisas ya que el programa no válida la conectividad entre los mismos, esto traería como consecuencia que se asigne un nodo adicional conformando una red errónea. Luego de terminar el dibujo de la red de fluidos, se carga la aplicación seleccionando en la pestaña *Administración*, el botón *Cargar aplicación*, mostrándose una ventana de exploración de archivo que permite seleccionar la aplicación a ejecutar, en este caso *SimulaciondeRedesdeFluido.dvb*, pulsando el botón *Cargar* y luego *Cerrar*.

Seguidamente, se selecciona en la misma pestaña de *Administración* el botón *Editor de Visual*

Basic y se ejecuta la aplicación cargada pulsando el botón *Ejecutar* o la tecla *F5*, en la pantalla aparece la ventana de la aplicación con las pestañas: *Fluido*, *Nodos*, *Tramos*, *Tuberías*, *Lazos*, *Caudales Externos* y *Solución*.

En la pestaña *Fluido*, se ingresan la densidad en g/cm^3 y la viscosidad absoluta en cP del fluido que circula por la red escribiendo el valor en las respectivas cajas de texto. En la Figura 7, se visualiza a la izquierda el archivo de dibujo con la red de fluidos representada con líneas y a la derecha, la ventana para la introducción de los datos correspondientes.

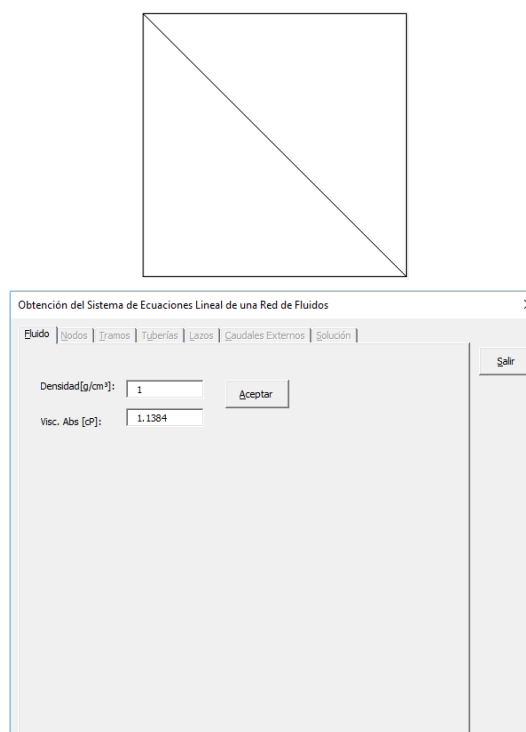


Figura 7: Datos del fluido de la red.

En la pestaña *Nodos* de la Figura 8 se realizan los procedimientos de: detección de los nodos, ordenamiento de las coordenadas de los nodos y la escritura del número del nodo en el dibujo. Así, la Figura 8 muestra una red de fluido que consta de 5 tuberías con coeficientes de fricción de $K1 = 2$, $K2 = 5$, $K3 = 1$, $K4 = 4$, $K5 = 1$; los 4 nodos con sus respectivos caudales externos y 2 lazos, siendo cada procedimiento como se describe a continuación.

Al pulsar el botón *DetectarNodos*, la aplicación extrae de la red dibujada, los identificadores

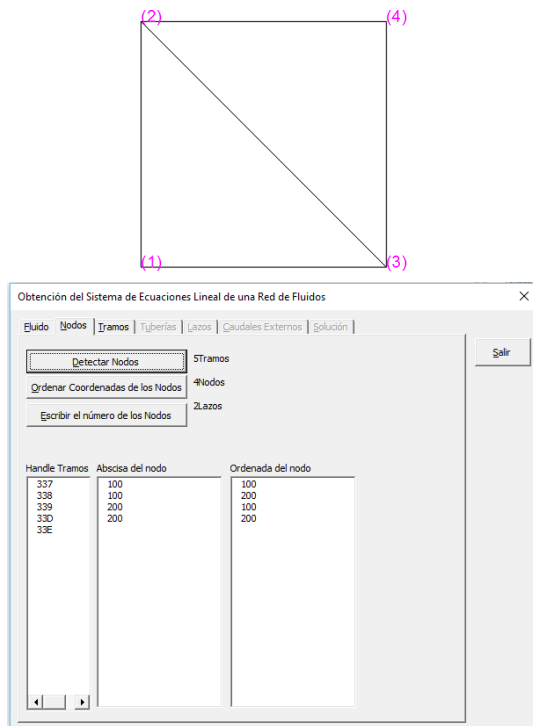


Figura 8: Identificación de los nodos de la red.

(Handle) de los objetos como línea, las coordenadas de sus extremos (nodos) sin repetirlos y la longitud de cada línea la cual se almacena en una matriz denominada *matTuberías*. Por lo tanto, con estos datos el sistema obtiene y muestra por pantalla la cantidad de tramos, nodos y por ende la cantidad de lazos disponibles para crear el sistema de ecuaciones de la red de fluidos.

Luego, mediante el botón *Ordenar Coordenadas de los Nodos*, se ordenan las coordenadas de los nodos con el fin de visualizar de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba la secuencia de la numeración de dichos nodos y con esto tener una mejor visualización de la red y ubicar fácilmente cualquier nodo. El botón *Escribir el Número de los Nodos* crea una capa de nombre *Nodos* y escribe el número entre paréntesis cerca de las coordenadas de dicho nodo según el orden asignado a cada uno de ellos en la red.

En la pestaña *Tramos*, mediante el botón *Ordenar Tramos* se correlaciona el orden de los tramos con el ordenamiento realizado de los nodos y posteriormente con el botón *Escribir el número de los Tramos*, se escribe en el dibujo el número dentro de corchetes que identifica cada tubería de

la red y una flecha que indica la dirección supuesta del flujo (Figura 9).

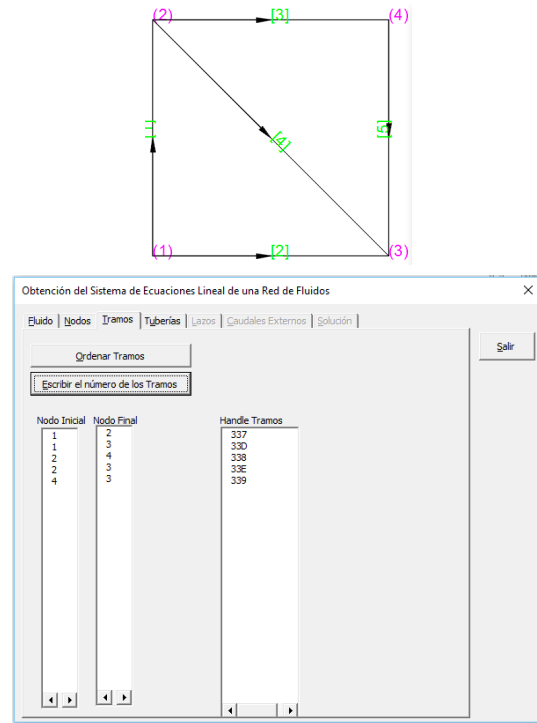


Figura 9: Identificación de los tramos de la red.

La pestaña *Tuberías*, recibe los datos de cada una de ellas. Es posible introducir directamente el factor de fricción o suministrar el diámetro interno de la tubería y la rugosidad para determinar en conjunto con la longitud, el factor de fricción de cada una (Figura 10).

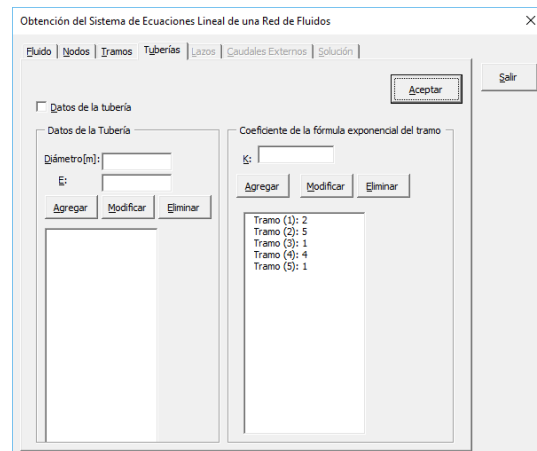


Figura 10: Coeficiente de fricción de la tubería.

Los lazos se definen en la pestaña *Lazos* mediante el botón *Buscar Camino* con un recorrido

en profundidad, de tal manera de obtener todas las trayectorias posibles que forman un lazo cerrado en la red. Finalmente con el botón *Lazos definitivos*, se definen los lazos necesarios y suficientes para completar las ecuaciones requeridas para completar el sistema de ecuaciones representativo de la red de fluidos (Figura 11). Para la red en el centro de la ventana se presenta la lista de adyacencia de los nodos y la cantidad posible de caminos encontrados en total 16.

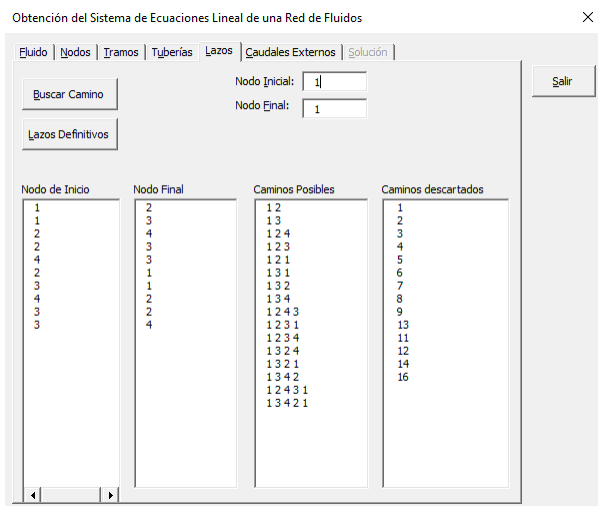


Figura 11: Lazos de la red.

La pestaña *Caudales Externos* solicita los datos referentes al caudal suministrado o extraído en cada uno de los nodos de la red (Figura 12).

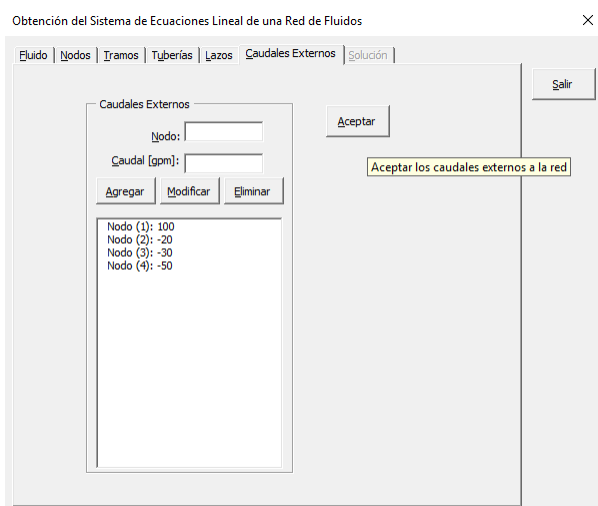


Figura 12: Caudales externos de la red.

En la pestaña *Solución*, finalmente con el botón

Llenar el Sist. Ec. se crea la matriz mediante la obtención de los coeficientes del sistema de la red conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos. Así, en la Tabla 1 se muestra la matriz resultante con los valores obtenidos a través de las respectivas ecuaciones tanto en los nodos como en los lazos de acuerdo al siguiente ejemplo:

Tabla 1: Representación matricial del sistema de ecuaciones de la red (Figura 13).

Ecuaciones	Caudal en [m ³ /h]					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	QE
Continuidad en los nodos	-1	-1	0	0	0	100
	1	0	-1	-1	0	-20
	0	1	0	1	1	-50
Balance de energía en los lazos	-2	5	0	-4	0	0
	-2	5	-1	0	-1	0

El botón *Resolver* (Figura 13), invoca el método teórico lineal utilizando el método de Gauss-Jordan [16] para resolver el sistema de ecuaciones lineal de la red y el botón *Escribir Caudales*, escribe el valor de los caudales en el dibujo obtenidos como resultado de la solución final del sistema de ecuaciones .

En la ventana del programa se presenta, como parte del proceso de resolución de la red, el sistema de ecuaciones lineal inicial y seguidamente los caudales calculados que se obtienen en cada iteración, en la siguiente lista se muestra el resultado final obtenido y la cantidad de iteraciones realizadas según el valor de tolerancia previamente establecido entre los respectivos caudales de cada tramo específico. Una vez calculados los caudales finales mediante el botón *Escribir Caudales* se puede actualizar el dibujo utilizando la capa *Caudales*, con los valores correspondientes a cada tramo o tubería ubicando la información por encima de la línea que representa el mismo, el número del tramo se escribe entre corchetes y al lado se escribe el valor del caudal calculado en las mismas unidades de trabajo utilizadas para el caudal externo.

En consecuencia, si se requiere de un análisis particular, se pueden modificar los parámetros

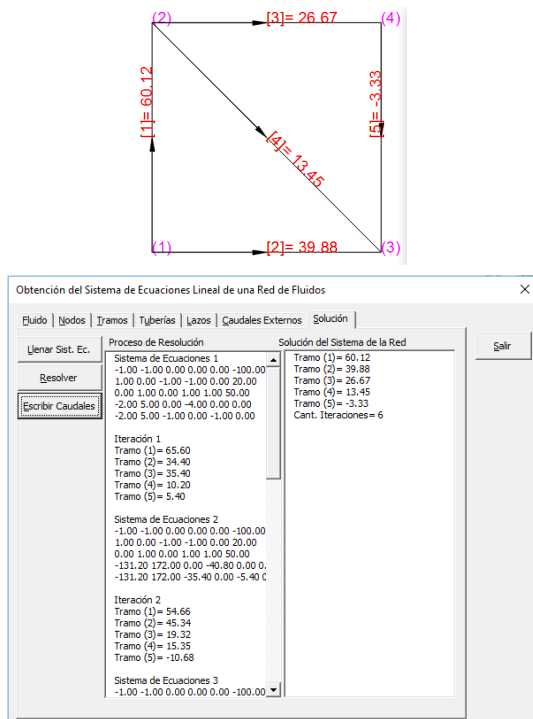


Figura 13: Solución final de la red con los caudales parciales en cada iteración.

correspondientes al fluido, las tuberías o la conformación de la red en el dibujo y calcular los nuevos caudales correspondientes a cada tramo. Esto permite analizar la influencia de los elementos que intervienen en la red sobre la distribución de los caudales finales.

Ejemplo 2. Ampliación de una red

El análisis de la red se realiza partiendo de la técnica de programación mediante una búsqueda en profundidad. En primer lugar se necesita conocer cuál es el conjunto de conexiones existentes entre las tuberías que conforman la red; por ejemplo, en una red sencilla de tres tuberías tal como se muestra en la Figura 14, se tiene el flujo externo en los nodos 1, 2 y 3 con valores de 100, -30 y -70 [m³/h] respectivamente, el valor positivo indica que el flujo entra a la red y el valor negativo que sale de la misma.

A partir del dibujo de la red inicial (Figura 14), el programa audita la base de datos del archivo de dibujo, determinando las coordenadas del punto de inicio y fin de las líneas, estos van a representar los nodos de la red; y los segmentos de línea

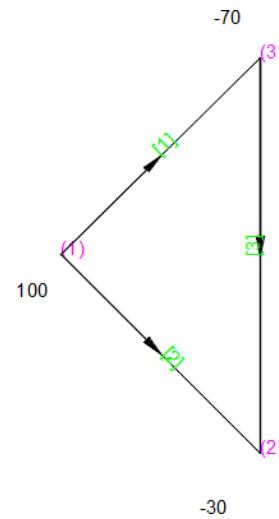


Figura 14: Red de tres tramos y tres nodos.

representan las tuberías. El sentido en que fue dibujada cada línea define el sentido de flujo supuesto en ese tramo (Tabla 2).

En el programa se identifica y enumera las tuberías de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba, utilizando como dato principal las coordenadas del punto de inicio o final, cualquiera de los dos que este más a la izquierda. De manera similar, se identifican y enumeran los nodos, conformados por el conjunto de uniones entre las líneas; es decir, donde coinciden puntos extremos de las líneas. Las características del fluido y de cada una de las tuberías deben ingresarse a través de la interfaz de la aplicación.

Tabla 2: Tabla de identificación de nodos y tramos de la red (Figura 14).

Nodos Iniciales	Nodos Finales	Tramos
(1)	(3)	[1]
(1)	(2)	[2]
(3)	(2)	[3]

Los valores del coeficiente de pérdida para las tuberías del ejemplo 2 son: $K1 = 1$, $K2 = 2$, $K3 = 1$; estos valores se introducen en el software en la pestaña *Tuberías*.

Por último, una vez que el programa determina la topología de la red, crea una matriz cuyo contenido son los coeficientes de las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía

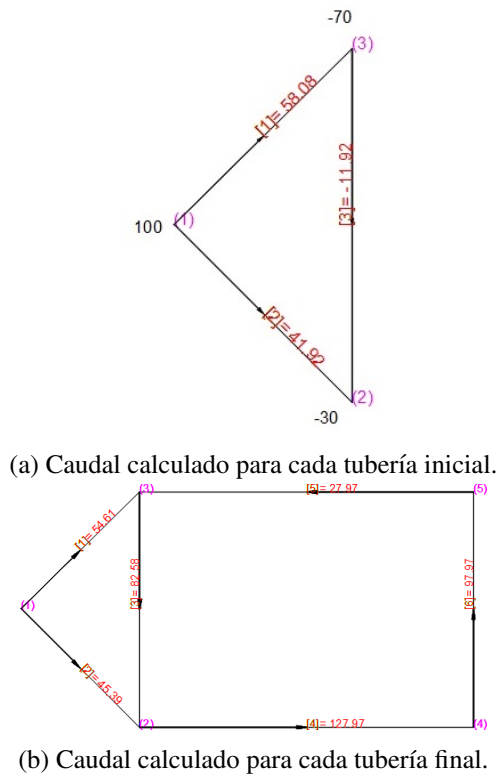


Figura 15: Caudal calculado.

en los lazos, finalmente resuelve los sistemas de ecuaciones necesarios mediante la aplicación del método teórico lineal; el resultado de este procedimiento permite obtener el valor del caudal de cada tubería de la red, quedando reflejados dichos en la Figura 15(a) para cada tubería para cada tubería.

El archivo de dibujo puede ser editable, si no se cuenta con el archivo original; basta con borrar el texto de la enumeración de los tramos, de los nodos y el valor de caudal de las capas de dibujo respectivas, hasta tener solamente el conjunto de líneas que conforman la red, luego de modificar la red o los datos de la misma se pueden calcular los nuevos valores mediante el procedimiento descrito en la metodología. Por ejemplo, si se amplía la red anterior, se logran obtener resultados como los mostrados en la Figura 15(b).

En resumen el programa detecta de un dibujo en AutoCAD que representa una red de fluido cerrada, los elementos necesarios para conformar el sistema de ecuaciones lineal que representa la red y calcular con el método teórico lineal los

caudales en todos los tramos. Los coeficientes de las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos se almacenan en una matriz como resultado del reconocimiento de las líneas en el dibujo y la secuencia como están conectadas, además de la introducción de los datos del fluido y de las tuberías. Todos los datos suministrados pueden ser modificados e inclusive el diseño de la red y obtener los nuevos resultados producto de dichas modificaciones. En cuanto al sentido de flujo de los caudales finales, un valor negativo indica que el fluido recorre en dirección contraria a la supuesta inicialmente.

5. Conclusiones.

El programa diseñado detecta los nodos y los tramos de una red cerrada dibujada en base a las coordenadas rectangulares de las líneas dibujadas en un archivo de CAD. Por medio de la estructura de dicho archivo crea un orden para la mejor visualización de los nodos y tramos de la red. Permitiendo que se pueda trabajar en conjunto con aplicaciones actuales como *Google Earth* para la obtención de datos geográficos de lugares y se dibuje la red a partir de dicha información.

El software desarrollado facilita el análisis de la red, realizando modificaciones de valores a los datos del fluido, de la tubería, de la topología de la red y de los caudales externos, permitiendo de esta manera poder realizar de manera didáctica un estudio más rápido y detallado de la red dibujada.

El programa es una propuesta de apoyo en la resolución de redes de fluidos malladas mediante el método de la teoría lineal, que muestra cada etapa de resolución de la red de fluido con la intención de presentar de manera intuitiva todos los pasos para la comprensión y análisis en el estudio del tema.

Mediante el subprograma del método de Gauss-Jordan para sistemas de ecuaciones, se resuelven los sistemas de ecuaciones lineales de la red conformada por las ecuaciones de continuidad en los nodos y de balance de energía en los lazos, con lo cual se dispone de una herramienta para su aplicación en la resolución de ejercicios.

En este trabajo no se incluye el estudio de acercamiento entre nodos de diferentes tramos debido a que AutoCAD ofrece herramientas de precisión para la unión de líneas en la edición del dibujo; sin embargo, se plantea su inclusión para trabajos futuros que verifiquen la correcta conformación de una red de fluidos, adicionalmente se sugiere agregar la resolución de redes de fluido abiertas y la incorporación de bombas, tanques y accesorios a la red. Igualmente en futuras investigaciones se debe evaluar el comportamiento de la herramienta en lo referente al manejo de caudales con magnitudes extremas, con respecto al valor de la tolerancia de cálculo utilizada para la estimación y convergencia de toda la red.

Para finalizar, el programa selecciona de las ecuaciones de lazo, los caminos de menor recorrido, en trabajos futuros se continuará con el análisis de la selección de diferentes caminos para evaluar la rapidez y la exactitud en la resolución de la red.

Referencias

- [1] R. Pérez. *Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua en redes ramificadas considerando los elementos de regulación*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1993.
- [2] AutoCAD 2015 Autodesk. *AutoCAD 2015: Complete Guide to What's New*. Autodesk, Inc., USA, 2015.
- [3] José Gamboa, J. García y R. Méndez. Desarrollo de un método para la solución de sistemas de tuberías abiertas. *Ingeniería*, 8(3):7–14, 2004.
- [4] Jesica Rivero. *Búsqueda rápida de caminos en grafos de alta cardinalidad estáticos y dinámicos*. Tesis de Doctorado, Departamento de Informática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2011.
- [5] J. Valls y D. Camacho. *Programación estructurada y algoritmos en Pascal*. Pearson Educación, Madrid, España, 2004.
- [6] Autodesk. *AutoCAD 2010. Manual de personalización*. Autodesk, Inc., California, EEUU, 2009.
- [7] Diana Santiváñez. Desarrollo de un software para cálculos hidráulicos de redes de tuberías con fluidos monofásicos. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2013.
- [8] Denis Montalbán. Respuesta transitoria del flujo al cierre de una válvula en una red de tuberías un enfoque numérico y experimental. Tesis de Maestría, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2004.
- [9] Yunus Çengel y J. Cimbala. *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, cuarta edición, 2012.
- [10] Bruce Munson, A. Rothmayer, T. Okiishi, and W. Huebsch. *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley, 6th edition, 2009.
- [11] R. Mott. *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación, México, sexta edición, 2006.
- [12] R. Giles, J. Evett y C. Liu. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. McGraw Hill, México, tercera edición, 1994.
- [13] J. Saldarriaga. *Hidráulicas de tuberías*. McGraw Hill Interamericana, S. A., Colombia, 1998.
- [14] L. Ambrosius. *AutoCAD Platform Customization: User Interface, AutoLISP, VBA, and Beyond*. Wiley, Indianapolis, 2015.
- [15] L. Joyanes y I. Zahonero. *Estructura de datos en Java*. McGraw-Hill, Interamericana de España, S. A. U., España, 2008.
- [16] Steven Chapra y R. Canale. *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., México, sexta edición, 2011.

Analysis of manufacturing system containing a mutual exclusion in the context of Petri net theory.

Mata Guelvis^{*,a}, Méndez Arnaldo^b, Cardillo Juan^c, Chacón Edgar^c

^a*Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.*

^b*Departamento de Física y Matemáticas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela.*

^c*Escuela de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.*

Abstract.-

This article includes the terminology needed in a manufacturing context, to establish some analysis techniques of discrete event systems containing a mutual exclusion. More precisely, our problem is expressed as follows: given the specifications or requirements on a system of manufacturing containing a mutual exclusion, build a Petri net which structure and initial marking guarantee it bounded, live, and reversible.

Keywords: discrete event systems; Petri nets; mutual exclusion.

Análisis de sistemas de manufactura conteniendo una exclusión mutua usando redes de Petri.

Resumen.-

Este artículo incluye la terminología necesaria en un contexto de manufactura para establecer las técnicas de análisis más novedosas de los Sistemas de Eventos Discretos conteniendo una exclusión mutua. Mas precisamente, nuestro problema general es establecido como sigue: dadas las especificaciones o requerimientos en un Sistema de Manufactura conteniendo una exclusión mutua, construir una red de Petri cuya estructura y marcación inicial garanticen acotamiento, no bloqueo y reiniciabilidad.

Palabras clave: sistemas de eventos discretos; redes de Petri; exclusión mutua.

Recibido: Julio 2015

Aceptado: Marzo 2016

significa que un proceso ocupa el recurso) los otros procesos deben esperar por la liberación de dicho recurso.

1. Introducción

Un conflicto en un Sistema de Eventos Discreto (SED) ocurre cuando dos o más procesos están listos para ejecutar acciones diferentes que dependen directamente de la utilización de un recurso compartido. Tales acciones o eventos son llamados exclusivos mutuamente en el sentido que ellos no pueden ocurrir al mismo tiempo. De hecho, cuando uno de ellos toma lugar (lo cual

En este artículo incluiremos la terminología necesaria, en un medio ambiente de manufactura, para establecer algunos conceptos novedosos de síntesis de Redes de Petri (RP) conteniendo una Exclusión Mutua (EM). Mas precisamente, el problema general para la modelación y análisis de sistemas de manufactura usando RP, es expresado como sigue: dadas las especificaciones o requerimientos de un sistema de manufactura conteniendo una exclusión mutua, construir una RP cuya estructura y marcación inicial garanticen acotamiento, no bloqueo y reiniciabilidad.

*Autor para correspondencia

Correo-e: gmata@ula.ve (Mata Guelvis)

La organización de este artículo comienza por incluir las definiciones básicas de RP, sus propiedades y la metodología de modelación, lo cual constituye los fundamentos necesarios para nuestro problema. Luego, estableceremos la clasificación de lugares y un par de condiciones para facilitar la representación de la EM; y en consecuencia, expresar los resultados teóricos en este trabajo. Finalmente, presentaremos una aplicación.

2. Definiciones Básicas, Propiedades y Metodología de Modelación

Una Red de Petri (RP) es un cuádruple $R = (L, T, E, S)$ donde $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ es un conjunto finito de lugares, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ es un conjunto finito de transiciones, $L \cap T = \emptyset$, $E : T \rightarrow L^\infty$ es una función de entrada: para cada $t \in T$, $E(t) \in L^\infty$ es llamado multiconjunto de lugares de entrada para t (L^∞ denota el multiconjunto con números de ocurrencias ilimitado); y $S : T \rightarrow L^\infty$ es una función de salida: para cada $t \in T$, $S(t) \in L^\infty$ es llamado multiconjunto de lugares de salida para t .

Ahora, para determinar el comportamiento dinámico de la red damos paso a la representación de estatus de lugares asociando a cada lugar de la red un número natural que especifica un significado preciso de la condición del lugar. Formalmente, una RP marcada es un par $M = (R, m)$, donde R es una RP y $m : L \rightarrow \mathbb{N}$, $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$, es una función de marcación (o marcación): para cada $l_i \in L$, $m(l_i) \in \mathbb{N}$ es llamado número de fichas en el lugar l_i ; la cual especifica un vector $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$, $n = \text{card}L$, $m_i \in \mathbb{N}$, $i = 1, 2, \dots, n$ con $m(l_i) = m_i$ [1, 2].

Las RP marcadas pueden ser representadas por multigrafos dirigidos bipartitos donde los lugares son representados por círculos y las transiciones por barras. Si un lugar l_i es un lugar de entrada para una transición t ; es decir $l_i \in E(t)$, entonces hay $|l_i, E(t)|$ (número de veces que l_i está en el multiconjunto de lugares de entrada $E(t)$) arcos dirigidos del correspondiente círculo a la correspondiente barra. Si un lugar l_j es un

lugar de salida para la transición t ; es decir, $l_j \in S(t)$, entonces hay $|l_j, S(t)|$ (número de veces que l_j está en el multiconjunto de lugares de salida $S(t)$) arcos dirigidos de la correspondiente barra al correspondiente círculo. Finalmente, las fichas son representadas por puntos en el interior del círculo y, en consecuencia, la función de marcación es representada por el número de puntos en el interior de cada círculo.

En relación al comportamiento dinámico de una RP debemos considerar que una marcación representa el estatus de cada uno de los lugares en la red. Así, ésta especifica exactamente el estado actual del sistema que establece las condiciones lógicas para la ocurrencia de eventos, luego, una vez que ocurra un evento las condiciones del sistema varían dando lugar a una nueva marcación o estado. Más precisamente, una transición $t \in T$ en una RP marcada $M = (R, m)$ es llamada habilitada si $m(l_i) \geq |l_i, E(t)|$, para todo lugar $l_i \in L$. En este caso también diremos que la transición t es habilitada por la marcación m o disparable desde m . El conjunto de transiciones habilitadas por la marcación m es dado por $\mathcal{E}(m) = \{t \in T / m(l_i) \geq |l_i, E(t)|, \forall l_i \in L\}$.

Ahora, si $t \in \mathcal{E}(m)$ entonces la marcación m' dada por $m'(l_i) = m(l_i) - |l_i, E(t)| + |l_i, S(t)|$, $i = 1, 2, \dots, n$; $n = \text{card}L$, es llamada marcación alcanzable desde m por el disparo de t . Además, si $t' \in \mathcal{E}(m')$ y esta es disparada obtenemos como antes una marcación m'' , y así sucesivamente. Por lo tanto, se obtiene una función de cambio de marcaciones, la cual puede ser extendida de manera natural; es decir, si la función de cambio de marcaciones $\delta : \mathbb{N}^n \times T \rightarrow \mathbb{N}^n$, $n = \text{card}L$, es dada por $\delta(m, t) = m'$ donde $m'(l_i) = m(l_i) - |l_i, E(t)| + |l_i, S(t)|$, $i = 1, 2, \dots, n$; entonces su extensión es la función parcial $\widehat{\delta} : \mathbb{N}^n \times T^* \rightarrow \mathbb{N}^n$, dada por $\widehat{\delta}(m, \theta) = m$ y $\widehat{\delta}(m, \sigma t) = \delta(\widehat{\delta}(m, \sigma), t)$, $m \in \mathbb{N}^n$, $t \in T$, $\sigma \in T^*$. Aquí, T^* denota el monoide libre con unidad θ : T^* es el conjunto de todas las combinaciones finitas de elementos de T . Finalmente, como $\widehat{\delta}$ es una extensión de δ no haremos distinción notacional entre ambas.

Note que la función parcial de cambio de marcaciones δ está definida en (m, t) sí, y solamente sí, $t \in \mathcal{E}(m)$.

Por su parte, en una RP marcada $M = (R, m_0)$, una marcación $m \in \mathbb{N}^n$, $n = \text{card}L$, será llamada alcanzable desde m_0 sí existe una sucesión de disparos de transiciones $\sigma = t_{j_1}t_{j_2} \dots t_{j_k} \in T^*$ tal que $\delta(m_0, \sigma) = m$. Luego, el conjunto de alcanzabilidad de la RP desde la marcación m_0 es dado por $A(R, m_0) = \{m \in \mathbb{N}^n / \exists \sigma \in T^*, \delta(m_0, \sigma) = m\}$.

Ahora incluiremos algunas propiedades de RP las cuales serán útiles en un medio ambiente de manufactura.

Sea $M = (R, m_0)$ una RP marcada. Un lugar $l \in L$ es llamado k -acotado si existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $m(l) \leq k$, para todo $m \in A(R, m_0)$. Si todos los lugares en la red son k -acotados, entonces la red es llamada k -acotada o simplemente acotada. En particular, si la red es 1-acotada diremos que la red es segura. En manufactura el acotamiento implica, por ejemplo, ausencia de capacidad de desbordamiento y la seguridad determina la disponibilidad o no de un recurso simple.

Por otro lado, la red es llamada no bloqueada (viva) si para toda marcación $m \in A(R, m_0)$ y toda transición $t_i \in T$, existe una marcación $m' \in A(R, m_0)$ alcanzable desde m tal que $t_i \in \mathcal{E}(m')$. En la clase de sistemas que nos ocupa, el no bloqueo garantiza que el sistema no se estanca, lo cual implica que éste puede producir exitosamente.

Finalmente, otra propiedad de interés es la reiniciabilidad, la cual garantiza que para toda marcación $m \in A(R, m_0)$, $m_0 \in A(R, m)$. En nuestro contexto la reiniciabilidad implica el comportamiento cíclico de un sistema.

Un sistema de manufactura es un conjunto de actividades que interactúan con un conjunto de recursos para obtener un producto. Las actividades son los procesos de fabricación: maquinación, manejo de materiales y procesos de información; que son necesarios para la producción. Los recursos son el personal, las máquinas, los materiales, etc; que son necesarios para la ejecución de las actividades. Un sistema de manufactura incluye, por supuesto, un plan de proceso de producción (programa) que especifica las actividades y los recursos así como también las relaciones de precedencia entre actividades: algunas actividades

podrían ocurrir antes que otras. Adicionalmente, el programa puede especificar varios recursos para diferentes actividades y dar prioridad a alguna de ellas para la utilización de estos recursos.

La **metodología de modelación para sistemas de manufactura usando RP** es fundamentada en las interpretaciones de lugares, transiciones y fichas tal como sigue.

1. Identificar las actividades y recursos necesarios para la producción de un artículo (producto);
2. Ordenar las actividades por las relaciones de precedencia tal como lo establece el programa;
3. Para cada actividad, crear y etiquetar un lugar para representar su estatus; luego, etiquetar una transición (comienzo de actividad) creando finalmente un arco desde la transición hasta el lugar. Por último, crear una transición (completación de actividad) para incluir un arco desde el lugar a la transición. En general, la transición de Completación para una actividad será la transición de comienzo para la nueva actividad.
Una ficha en un lugar de actividad especifica que la actividad está siendo ejecutada y la ausencia de fichas en el lugar indica que la actividad no está siendo ejecutada. Múltiples fichas indicarán que la actividad está ocurriendo de manera múltiple;
4. Para cada actividad, crear y etiquetar un lugar para cada recurso que sea necesario para el comienzo de la actividad; luego, conectar todos estos lugares con la transición de comienzo de la actividad mediante arcos dirigidos desde los lugares a la transición de comienzo. Finalmente, crear un arco desde la transición de completación de la actividad a cualquier lugar de recurso que se haga disponible luego de la completación de la actividad.
Si un lugar representa un estatus de recurso, entonces una o más fichas en el lugar indican que el recurso está disponible y la ausencia de fichas indica la no disponibilidad del recurso.
5. Especificar la marcación inicial.

3. Lugares en manufactura y condiciones.

En relación a la metodología de modelación considerada en este artículo para sistemas de manufactura, hemos comentado que un lugar representa un estatus de recurso o de operación: si un lugar representa una operación, entonces una ficha en el lugar indica que la operación está siendo ejecutada, ninguna ficha en el lugar indica que la operación no está ocurriendo y múltiples fichas muestran que la operación está ocurriendo de manera múltiple. Sin embargo, cada lugar de operación debe ser seguro ya que la misma operación nunca puede ser ejecutada en la misma máquina más de una vez al mismo tiempo: una operación puede ser dividida en varias sub-operaciones; así, un lugar de operación puede ser reemplazado por una subred en un modelo RP. En lo que sigue usaremos L_o para denotar el conjunto de lugares de operaciones. Ahora, si un lugar representa un recurso entonces el número de fichas en este lugar puede ser constante: robots, máquinas, transportadores, etc; o variable: trabajos, instalaciones, etc. Por lo tanto, podemos dividir los lugares de recurso en dos clases disjuntas: L_f = conjunto de lugares de recursos cuyo número es fijo y L_v = conjunto de lugares de recursos cuyo número es variable. L_v juega un papel clave en el medio ambiente de recursos compartidos: el número inicial de fichas en cada lugar de L_v debe ser determinado de tal manera que el sistema modelado sea libre de estancamiento. Finalmente, hemos particionado el conjunto de lugares L como $L = L_o \cup L_f \cup L_v$.

Establecidas las características que definen un sistema de manufactura junto con la metodología de modelación incluida en este artículo, para ésta clase de sistemas es claro que las funciones de entrada E y salida S tienen rango en el conjunto potencia de L : para cualesquiera $l \in L$ y $t \in T$, $|l, E(t)| \leq 1$ y $|l, S(t)| \leq 1$. Por lo tanto, en lo que sigue solamente haremos referencia a ésta clase de redes.

Sea $R = (L, T, E, S)$ una RP. Un nodo en R es un lugar $l \in L$ o una transición $t \in T$. En relación al grafo de R incluiremos las definiciones siguientes. Un camino elemental en R es una sucesión de

nodos $x_1 x_2 \dots x_k$, $k \geq 1$, tal que si $k > 1$ entonces $x_i \neq x_j$, $\forall i \neq j$, $1 \leq i, j \leq k$. Notación: $c(x_1, x_k)$.

Por su parte, un circuito elemental en R es una sucesión de nodos $x_1 x_2 \dots x_k$, $k > 1$, tal que si $x_i = x_j$, $1 \leq i < j \leq k$, entonces $i = 1$ y $j = k$. Notación: $c(x_1)$.

Por otro lado, sea $L = L_o \cup L_f \cup L_v$ una partición dos a dos disjunta de L . Un O -camino entre los nodos x e y es un camino elemental $x x_1 x_2 \dots x_k y$ tal que $x_i \in L_o \cup T$, $\forall i$, $1 \leq i \leq k$; $x, y \notin L_o$. Note que, los arcos en los grafos asociados a RP contienen un nodo en T y el otro en L (grafos bipartitos). Así, un O -camino es una sucesión finita de arcos que expresa una sucesión finita de actividades u operaciones. En particular, si un O -camino comienza y finaliza con transiciones y los lugares constituyendo el O -camino no tienen fichas inicialmente, entonces esto podría representar en manufactura una secuencia para algún tipo de trabajo.

Por conveniencia trataremos a $c(x_1, x_n)$ como un conjunto; por lo tanto, $x \in c(x_1, x_n)$ significa que x es un nodo sobre el camino elemental entre x_1 y x_n . En este caso escribiremos $c(x_1, x_n) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. También, trataremos a $c(x_1, x_n)$ como el conjunto de todos los caminos elementales entre x_1 y x_n ; análogamente, estas consideraciones son ajustadas a los circuitos $c(x_1)$. En consecuencia, si no hay caminos elementales entre x_1 y x_n escribiremos $c(x_1, x_n) = \emptyset$. Finalmente, si Y es un conjunto de nodos, entonces $c(x, Y) := \{w/\exists y \in Y, \exists c(x, y), w \in c(x, y)\}$ es el conjunto de todos los nodos sobre los caminos elementales entre x y Y .

Con la finalidad de formalizar el concepto de exclusión mutua, formulado en la próxima sección, incluiremos la definición siguiente que determina una condición para la clasificación de lugares en una estructura RP.

Condición CL. Una RP marcada $M = (R, m_0)$, $R = (L, T, E, S)$, con $L = L_o \cup L_f \cup L_v$ una partición dos a dos disjunta de L especificando los conjuntos de o -lugares, f -lugares y v -lugares, posee la condición **CL** si:

$$l' \in (L_f \cup L_v) \cap E(t_j), m_0(l') = 0,$$

$$m_0(l) = \begin{cases} 0, & \text{si } l \in L_o \\ \geq 1, & \text{si } l \in (L_f \cup L_v) \setminus \{l'\} \end{cases}$$

$$\Rightarrow t_{j_i} \notin \mathcal{E}(m), \forall m \in A(R, m_0).$$

En este caso también diremos que $L_f \cup L_v$ satisface la condición **CL**.

Uno puede notar desde la condición **CL** que ningún recurso en un lugar de $L_f \cup L_v$ puede ser transformado en un recurso en otro lugar diferente de $L_f \cup L_v$.

Como comentamos anteriormente, en un contexto de manufactura los lugares de recurso son incluidos para representar estatus de disponibilidad de máquinas, robots, materia prima, instalaciones, etc. Más aún, si dos fichas representan situaciones diferentes entonces éstas no son surtidas en un mismo lugar (posiblemente representando alguna operación). De hecho, las fichas son incluidas para representar contenidos diferentes que van a un lugar idéntico mediante una transición común; es decir, mediante sincronización. Esta sincronización podría, por ejemplo, determinar el comienzo de una operación. Por lo tanto, las fichas de cualesquiera dos o más lugares de recursos fluyen en un lugar común solamente mediante la misma transición. Este comentario motiva la condición siguiente.

Condición S. Una RP marcada $M = (R, m_0)$, $R = (L_o \cup L_f \cup L_v, T, E, S)$, posee la condición **S** si para cada par $l, l' \in L_f \cup L_v, l \neq l', t \in T$ y O -caminos $c(l, t)$ y $c(l', t)$, si existen, se tiene que el primer encuentro (o intersección) entre los O -caminos ocurre en una transición.

Un comentario final corresponde al hecho de que la condición **S** no implica la condición **CL**; e inversamente, la condición **CL** no implica la condición **S**.

4. Exclusión Mutua en manufactura.

Una vez que el modelo RP sea satisfactorio: no bloqueado, acotado y reinicializable entonces es posible transformar las definiciones de una RP en códigos de control supervisorios para sistemas de manufactura. Por lo tanto, la modelación sistemática de un sistema es muy importante. Justamente

esta sección está direccionada hacia el problema de análisis para sistemas de manufactura con recursos compartidos por procesos independientes. Para esto, formularemos el concepto de exclusión mutua (**EM**) (Definición 1) en el contexto de RP, conforme a los trabajos de Zhou y Dicesare [3], y Mata *et al* [4], e incluiremos las condiciones bajo las cuales las RP conteniendo tal estructura son no bloqueadas, acotadas y reinicializables.

En lo que sigue, el i -ésimo proceso, $i = 1, 2, \dots, k$, será modelado por un par de transiciones (t_{a_i}, t_{b_i}) y el recurso compartido será modelado por un lugar l_E .

Definición 1 (k -EM). Sea $M = (R, m_0)$, $R = (L, T, E, S)$, $L = L_o \cup L_f \cup L_v$, una RP marcada. Una k -exclusión mutua para M (k -EM) es un par (l_E, φ) tal que:

1) $l_E \in L_f$, $m_0(l_E) = 1$ y $\varphi := \{(t_{a_1}, t_{b_1}), (t_{a_2}, t_{b_2}), \dots, (t_{a_k}, t_{b_k})\}, k \geq 1$, es un conjunto finito de pares de transiciones satisfaciendo las condiciones siguientes:

$$(1.1) \quad i \neq j, 1 \leq i, j \leq k \Rightarrow t_{a_i} \neq t_{b_j}, t_{a_i} \neq t_{a_j}, t_{b_i} \neq t_{b_j};$$

$$(1.2) \quad t_{a_i} \neq t_{b_i}, 1 \leq i \leq k \Rightarrow |l_E, E(t_{a_i})| = |l_E, S(t_{b_i})| = 1, |l_E, S(t_{a_i})| = |l_E, E(t_{b_i})| = 0; t_u \notin T_a \cup T_b, T_a = \{t_{a_i} / 1 \leq i \leq k\}, T_b = \{t_{b_i} / 1 \leq i \leq k\} \Rightarrow |l_E, E(t_u)| = |l_E, S(t_u)| = 0;$$

$$(1.3) \quad 1 \leq i \leq k, l \in L_v, l \in c(t_{a_i}) \Rightarrow t_{b_i} \in c(t_{a_i});$$

$$(1.4) \quad 1 \leq i \leq k, c(t_{a_i}) \cap (L_f \cup L_v) = \{l_E\} \Rightarrow t_{b_i} \in c(t_{a_i});$$

$$(1.5) \quad 1 \leq i \leq k, t \in T, t \in c(t_{a_i}, t_{b_i}) \Rightarrow t \in c(t_{a_i}, t_{b_i}) = O\text{-camino}.$$

2) $L_f \cup L_v$ satisface las condiciones **CL** y **S**;
 $t \in T_b, t' \in T_a \Rightarrow \nexists c(t, t') = O\text{-camino}.$

Condiciones del comportamiento dinámico de una RP $M = (R, m_0)$ conteniendo una k -exclusión mutua, con una clasificación de lugares dada.

1') Existen una marcación m_1 y una sucesión de disparos de transiciones σ que no contiene transiciones en T_a tales que $t \in \mathcal{E}(\delta(m_1, \sigma))$, para todo $t \in T_a$ (T_a es como en (1.2) de la definición 1).

2') Para toda marcación m_1 , si t_{a_j} dispara en $m \in A(R, m_1)$ entonces para todo $t \in T$ tal que $c(t_{a_j}, t) \neq \emptyset$ y $t_{b_j} \notin c(t_{a_j}, t)$, t es permitida y para toda sucesión de disparos de transiciones σ_j que no contiene a t_{b_j} existe h_j tal que $t_{b_j} \in \mathcal{E}(\delta(m, t_{a_j}\sigma_j h_j))$; más aún, si $m(l_E) = 1$ y $t_u \in \mathcal{E}(m)$, entonces $t_u \notin T_b$ (T_b es como en (1.2) de la definición 1).

Proposición 1. Sea $M' = (R', m'_0)$ conteniendo una k -EM (l_E, φ) y satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, con $R' = (L_o \cup (L_f \cup \{l_E\}) \cup L_v, T', E', S')$. Si existe una sucesión de disparos de transiciones σ que no contiene a t_{b_i} tal que $t_{a_i}\sigma t_{b_i}$ es disparable desde $m \in A(R', m'_0)$, entonces σ no contiene a t_{a_j} , para todo j , $1 \leq j \leq k$, i , $1 \leq i \leq k$.

Demostración:

Desde la condición 2') se sigue que el disparo de t_{a_i} remueve la única ficha en l_E ; en consecuencia, ninguna transición t tal que $|l_E, E'(t)| = 1$ es habilitada antes del disparo de la transición t_{b_i} , para todo i , $1 \leq i \leq k$. De aquí que t_{a_j} no puede disparar, para todo j , $1 \leq j \leq k$. Por lo tanto, σ no contiene a t_{a_j} para todo j , $1 \leq j \leq k$. ■

Observación 1. La proposición 1 establece que si el recurso compartido es ocupado por algún proceso, entonces éste no puede ser utilizado por ningún otro proceso hasta que dicho recurso sea liberado.

Proposición 2. Sea $M' = (R', m'_0)$ una RP marcada conteniendo una k -EM (l_E, φ) y satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, con $R' = (L_o \cup (L_f \cup \{l_E\}) \cup L_v, T', E', S')$. Entonces, l_E es un lugar seguro.

Demostración:

La condición 2') establece que ninguna transición en $T_b = \{t_{b_i} / 1 \leq i \leq k\}$ es habilitada cuando $m(l_E) = 1$; en consecuencia, $m(l_E) \leq 1$ para todo $m \in A(R', m'_0)$. Por lo tanto, l_E es un lugar seguro. ■

En lo que sigue siempre supondremos dada una RP marcada $M' = (R', m'_0)$ conteniendo una k -EM (l_E, φ) y satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, con $R' = (L_o \cup (L_f \cup \{l_E\}) \cup L_v, T', E', S')$, y una subred M de M' , $M = (R, m_0)$, $R = (L_o \cup L_f \cup L_v, T, E, S)$: $T = T'$; $l \in L_o \cup L_f \cup L_v$, $t \in T \Rightarrow |l, E(t)| = |l, E'(t)|$, $|l, S(t)| = |l, S'(t)|$; $m_0(l) = m'_0(l)$ [5].

Teorema 1. Si M es acotada (respectivamente segura), entonces M' es acotada (respectivamente segura).

Demostración:

Sea M' una RP marcada conteniendo una k -EM (l_E, φ) , satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, y $A(R', m'_0)$ el conjunto de alcanzabilidad de M' . Supongamos que $m(l_E)$ es la última componente de cualquier marcación $m \in A(R', m'_0)$ y consideremos el conjunto $Q(R', m'_0) = \{\mu / (\mu, m(l_E)) \in A(R', m'_0)\}$; es decir, los elementos μ de $Q(R', m'_0)$ poseen las mismas componentes que m excepto a $m(l_E)$.

Si $m \in A(R', m'_0)$, entonces m es alcanzable desde m'_0 por los disparos sucesivos de transiciones determinados por alguna sucesión σ ; es decir, $(\mu, m_0(l_E))$ es alcanzable desde $(m_0, 1)$ por el disparo de σ . Por lo tanto, μ es alcanzable desde m_0 por el disparo de σ . En consecuencia, $m \in A(R, m_0)$. Como $A(R, m_0)$ es acotado entonces μ es acotado, y por la proposición 2 $m(l_E)$ es seguro. Finalmente, $A(R', m'_0)$ es acotado. Por lo tanto, M' es acotada.

Análogamente se procede para el caso de la seguridad. ■

Teorema 2. Si M es no bloqueada, entonces M' es no bloqueada.

Demostración:

Sea M_k una RP marcada conteniendo una k -EM (l_E, φ_k) y satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, y $A(R_k, m'_0)$ el conjunto de alcanzabilidad de M_k . Como en la prueba del Teorema 1, supondremos que $m(l_E)$

es la última componente de toda marcación en $A(R_k, m'_0)$ y consideremos el conjunto

$$Q(R_k, m'_0) = \{\mu / (\mu, m(l_E)) \in A(R_k, m'_0)\}.$$

Por inducción sobre k .

Para $k = 1$ (esto significa que M_1 contiene una 1-EM (l_E, φ_1) que satisface las condiciones del comportamiento dinámico, con $\varphi_1 = \{(t_{a_1}, t_{b_1})\}$) tenemos que probar que para toda marcación $m \in A(R_1, m'_0)$, existe una sucesión de disparos de transiciones cuyo disparo habilita a t .

Sean $t \in T$ y $m \in A(R_1, m'_0)$, y supongamos que $m(l_E) = 1$, entonces $m = (\mu, 1)$. Ahora, supongamos que $m(l_E) = 0$ (esto significa que el número de disparos de t_{a_1} es uno o más que el número de disparos de t_{b_1}). Como (l_E, φ_1) es una 1-EM, entonces existe una sucesión de disparos de transición σ que permite a t_{b_1} .

Sea m' la marcación alcanzada por el disparo de σt_{b_1} , con $m'(l_E) = 1$. Sea $m' = (\mu, 1)$, entonces por la prueba del Teorema 1 $\mu \in A(R, m_0)$. Luego, para μ y t en M estudiaremos los dos casos posibles: $c(t_{a_1}, t) \neq \emptyset$ o $c(t_{a_1}, t) = \emptyset$.

Supongamos que $c(t_{a_1}, t) \neq \emptyset$, entonces de el no bloqueo de M se sigue que existe una sucesión σ , que no contiene a t_{a_1} en M , tal que μ' es alcanzable desde μ por el disparo de σ y t_{a_1} es habilitada por μ' . Luego, σ puede disparar en M_1 ; de donde, m'' es alcanzable desde m' por el disparo de σ , para algunas marcaciones m' y m'' en M_1 , y t_{a_1} es habilitada por m'' . Ahora, si $t_{b_1} \notin c(t_{a_1}, t)$ entonces desde la condición 2') se sigue que t es habilitada por m'' ; en otro caso, como $t_{b_1} \in c(t_{a_1}, t)$, el O -camino $c(t_{b_1}, t) = \emptyset$. En M , existe h tal que μ'' es alcanzable desde μ por el disparo de h y t es habilitada por μ'' . Así, nosotros podemos reordenar a h de manera que cada disparo de t_{a_1} sea seguido por t_{b_1} . Por lo tanto, h es disparable y habilita a t en M_1 . Esto prueba el primer caso.

Para el segundo caso, supongamos que $c(t_{a_1}, t) = \emptyset$.

Desde el no bloqueo de M se sigue que existe σ tal que μ' es alcanzable desde μ por el disparo de σ y t es habilitada por μ' . Ahora, se puede seleccionar a σ de manera que ésta sucesión no contenga a t_{a_1} . Por lo tanto, σ es disparable en M_1 y habilita a t . Esto completa la prueba cuando $k = 1$.

Supongamos que para $k \leq n$ las conclusiones son verdaderas (Hipótesis de Inducción).

Sea $(l_E, \varphi_{n+1}) = (l_E, \varphi_n \cup (t_a, t_b))$ una $(n + 1)$ -EM satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico.

Queremos probar que t es habilitada, $\forall t \in T$, $m \in A(R_{n+1}, m'_0)$.

Hay ciertamente dos posibilidades:

- (1) $m \in A(R_n, m'_0)$;
- (2) $m = (\mu, m(l_E)) \notin A(R_n, m'_0) \Rightarrow (\mu, 1) \in A(R_n, m'_0)$.

Por la hipótesis de inducción, existe σ en M_n tal que t es habilitada por la marcación alcanzada desde m por el disparo de σ , o t es habilitada por la marcación alcanzada desde $(\mu, 1)$ por el disparo de σ .

En relación a (1), hay tres subcasos:

- (1.1) Si σ no contiene a t_a ni a t_b , así como también ningún camino elemental entre t_a y t_b entonces σ es disparable en M_{n+1} . Por lo tanto, la marcación alcanzable por el disparo de σ en m también habilita a t en M_{n+1} .
- (1.2) Si $m(l_E) = 1$ y σ contiene una o más veces a t_a , entonces necesitamos probar que existe σ' tal que la marcación alcanzada por el disparo de σ' en m habilita a t en M_{n+1} .

Como (l_E, φ_{n+1}) es una $(n + 1)$ -EM satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, entonces σ puede ser ordenada de una de las dos maneras siguientes, sin cambiar la marcación resultante:

$\sigma_1 t_a w_1 t_b \sigma_2 t_a w_2 t_b \dots t_a w_l t_b \sigma_{l+1}$, $l \geq 1$ ó $\sigma_1 t_a w_1 t_b \sigma_2 t_a w_2 t_b \dots \sigma_l t_a w_l$, $l \geq 1$, donde w_i y σ_i no contiene a t_a ni a t_b , y σ_i no contiene transiciones en $c(t_a, t_b)$.

Consideremos la primera forma:

$\sigma_1 t_a w_1 t_b \sigma_2 t_a w_2 t_b \dots t_a w_l t_b \sigma_{l+1}$, $l \geq 1$.

Por la proposición 2, aplicada a la RP marcada M_n conteniendo una n -EM satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico, tenemos que σ_i contiene a lo sumo un elemento en $T_a = \{t_{a_i} / 1 \leq i \leq n\}$, digamos t_{a_j} , seguido por la transición t_{b_j} . Si existe, por ejemplo, $t_{a_j} h_i t_{b_j}$ en σ_i entonces $t_{a_j} h_i t_{b_j}$ puede ser aplicado en M_{n+1} , donde

h_i no contiene transiciones en T_a , $\forall i, 1 \leq i \leq l + 1$. Por lo tanto, sin pérdida de generalidad, supongamos que para $1 \leq i \leq l$, $\sigma_i = t_a h_i$ y $w_i = \gamma_i t_b e_i$ existe $\zeta_i = \sigma_i t_a w_i t_b = t_a h_i t_a \gamma_i t_b e_i t_b$ en σ tal que ζ_i no puede disparar en M_{n+1} . Probaremos que $\zeta'_i = t_a h_i \gamma_i t_b t_a e_i t_b$ puede disparar en M_{n+1} y que la marcación resultante del disparo es la misma que la producida por el disparo de ζ_i en M_n .

Afirmación: ζ'_i es disparable en M_n . En efecto, si ζ'_i no es disparable en M_n , entonces existe una transición, digamos t' , en $\gamma_i t_b$ cuyo disparo necesita del disparo de las transiciones t_{a_j} y t_a . Esto podría ser verdadero en M_{n+1} ; sin embargo, como (l_E, φ_{n+1}) es una $(n + 1)$ -EM satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico $\varphi_{n+1} = \varphi_n \cup \{(t_a, t_b)\}$ entonces se excluye la existencia de t' . Esto es una contradicción. Por lo tanto, ζ'_i es disparable en M_n .

Ahora, $\forall l \in L, \eta \in A(R_n, m'_0)$, el número de fichas en l en la marcación resultante del disparo de ζ'_i en η es igual al número de fichas en l , en la marcación resultante del disparo de ζ_i en η . En efecto, de acuerdo a la regla de disparos, en una RP marcada tenemos que $\forall l \in L$ y $t, t' \in T$, si tt' y $t't$ son disparables en $\tau \in A(R_n, m'_0)$, entonces el número de fichas en l en la marcación resultante del disparo de $t't$ en τ es igual a $\tau(l) - |l, E(t)| + |l, S(t)| - |l, E(t')| + |l, S(t')|$. Así, el número de fichas en l en las marcaciones resultantes de los disparos de tt' y $t't$ en τ son iguales.

Ahora, como ζ'_i y ζ_i son disparables y contienen las mismas transiciones, entonces la conclusión es verdadera. Análogamente, se puede mostrar que para todo $l \in L$, el número de fichas en l en las marcaciones resultantes de los disparos de $t_a h_i t_a \gamma_i t_b e_i t_b$ y $t_a h_i \gamma_i t_b t_a e_i t_b$ en m son iguales. Finalmente, usando la técnica anterior σ puede ser transformada en σ' , la cual puede disparar; así, t es habilitada por M_{n+1} .

Consideremos la segunda forma:

$$\sigma_1 t_a w_1 t_b \sigma_2 t_a w_2 t_b \dots \sigma_l t_a w_l, l \geq 1.$$

Usando la misma técnica anterior, σ' puede ser obtenida desde σ y así t es habilitada por

la marcación alcanzada por el disparo de σ' en m . Luego, t es habilitada por M_{n+1} .

(1.3) Si $m(l_E) = 0$ y σ contiene tanto a t_a como a transiciones sobre los caminos entre t_a y t_b , una o varias veces; entonces se puede probar análogamente que existe σ' tal que la marcación alcanzada por el disparo de σ' en m habilita a t en M_{n+1} .

En relación a la posibilidad (2), se puede construir una prueba análoga a la prueba de la posibilidad (1). Por lo tanto, M_{n+1} es no bloqueada. ■

Teorema 3. Si M es reinicializable, entonces M' es reinicializable.

Demostración:

La prueba es análoga a la del Teorema 2 y es también realizada por inducción sobre k .

Para toda $m \in A(R_{n+1}, m'_0)$, queremos probar que existe σ en M_{n+1} tal que m'_0 es alcanzable desde m por el disparo de σ . Como $m \in A(R_n, m'_0)$ o $(\mu, 1) \in A(R_n, m'_0)$, entonces existe σ en M_n tal que m'_0 es alcanzable desde m por el disparo de σ o m'_0 es alcanzable desde $(\mu, 1)$ por el disparo de σ . Finalmente, usando un razonamiento análogo al de la prueba de el no bloqueo de M_{n+1} obtenemos la conclusión del teorema. ■

5. Aplicación.

Consideremos un sistema de ensamblaje constituido por dos estaciones de trabajos E_1 y E_2 , y por dos robots R_1 y R_2 (ver Figura 1).

Las especificaciones del sistema son dadas a continuación.

1. Cuando la estación de trabajo E_1 está lista para ejecutar la tarea de ensamblaje, ésta primeramente requiere la utilización del robot R_1 , que es adquirido por E_1 siempre que esté disponible. También, cuando E_2 está lista para ejecutar una tarea, ésta primeramente requiere la utilización de R_2 , que es adquirido por E_2 siempre que esté disponible.

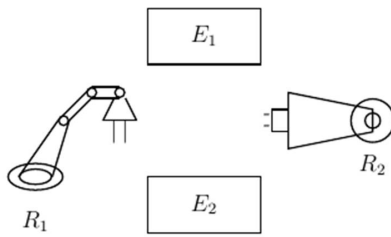


Figura 1: Ilustración de un sistema de ensamblaje con dos robots y dos estaciones de trabajos.

2. Después que la estación de trabajo E_i adquiere R_i ésta requiere la utilización del robot R_j , $i \neq j$, y lo adquiere si está disponible.
3. Cuando alguna estación de trabajo comienza una tarea de ensamblaje, ésta no puede ser interrumpida hasta su completación.
4. Cuando alguna estación de trabajo completa una tarea de ensamblaje, ésta libera ambos robots.

Usando la metodología de modelación para armar el diseño RP, tal como fue establecida en el apartado 2, tenemos que:

1. Las actividades son los procesos de adquisición de los robots R_1 y R_2 , y ensamblajes por parte de las estaciones de trabajos E_1 y E_2 .
2. El orden de las actividades es dado en la tabla siguiente:

Tabla 1: Orden de las actividades en un Sistema de Ensamblaje.

E_1	E_2
Adquiriendo R_1	Adquiriendo R_2
Adquiriendo R_2	Adquiriendo R_1
Ensamblando	Ensamblando

3. En relación al orden de las actividades correspondientes a la estación de trabajo E_1 , tal como fue establecido en 2, son creados respectivamente los lugares l_2 , l_3 y l_4 . La Figura 2 muestra esta sucesión de actividades

junto con sus transiciones de comienzos y completaciones: t_1 representa el comienzo de adquisición de R_1 por E_1 , t_2 es el comienzo de adquisición de R_2 por E_1 , t_3 representa el comienzo de ensamblaje en E_1 y t_4 modela la completación de ensamblaje en E_1 . Análogamente se procede para la sucesión de actividades correspondiente a E_2 .

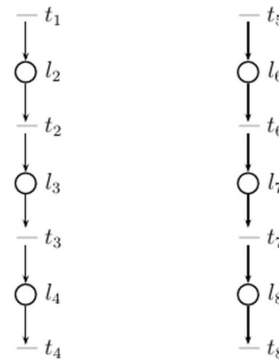


Figura 2: Dos fragmentos de una RP modelando las sucesivas actividades de un sistema de ensamblaje.

4. Para la actividad l_2 es necesario $l_1 :=$ la solicitud de R_1 por E_1 ; así como también $l_9 :=$ la disponibilidad de R_1 . Luego, creamos un arco desde cada uno de estos lugares a la transición t_1 . Después que R_1 es adquirido por E_1 , la nueva operación es adquirir R_2 para lo cual es necesario $l_{10} :=$ disponibilidad de R_2 . Así, creamos un arco desde l_{10} a t_2 . Ahora, una vez que R_2 es adquirido, E_1 comienza la tarea de ensamblaje (esto es modelado por el arco desde l_3 a t_3 y el arco desde t_3 a l_4 tal como es mostrado en la Figura 2). Después de la tarea de ensamblaje los dos robots son liberados. Esto es representado por el par de arcos de salidas desde t_4 a l_9 y l_{10} . Finalmente, creamos un arco desde t_4 a l_1 para representar requerimientos repetidos. Análogamente modelamos la estructura correspondiente a E_2 (ver Figura 3).
5. La marcación inicial es $m_0 = (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1)$. m_0 indica que inicialmente hay dos solicitudes desde las estaciones de trabajos E_1 y E_2 , y los robots R_1 y R_2 están disponibles.

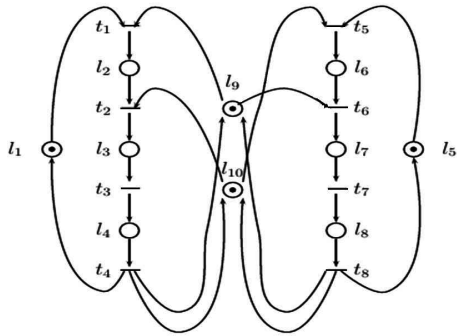


Figura 3: Una RP marcada representando un sistema de ensamblaje.

Para finalizar, todas las transiciones y lugares son dadas en la siguiente tabla

Tabla 2: Lugares y transiciones.

Lugares
$l_1 = E_1$ solicita R_1
$l_2 = E_1$ adquiere R_1
$l_3 = E_1$ adquiere R_2
$l_4 =$ ensamblando en E_1
$l_5 = E_2$ solicita R_2
$l_6 = E_2$ adquiere R_2
$l_7 = E_2$ adquiere R_1
$l_8 =$ ensamblando en E_2
$l_9 =$ disponibilidad de R_1
$l_{10} =$ disponibilidad de R_2
Transiciones
$t_1 =$ comienzo de adquisición de R_1 por E_1
$t_2 =$ comienzo de adquisición de R_2 por E_1
$t_3 =$ comienzo de ensamblaje en E_1
$t_4 =$ completación de ensamblaje en E_1
$t_5 =$ comienzo de adquisición de R_2 por E_2
$t_6 =$ comienzo de adquisición de R_1 por E_2
$t_7 =$ comienzo de ensamblaje en E_2
$t_8 =$ completación de ensamblaje en E_2

En relación a la RP marcada ilustrada en la Figura 3, consideremos los pares $(l_9, \{(t_1, t_4), (t_6, t_8)\})$ y $(l_{10}, \{(t_2, t_4), (t_5, t_8)\})$.

Ninguno de estos pares determinan una estructura de exclusión mutua para la red satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico. En efecto, falla la condición 2'). Por ejemplo, con $(l_9, \{(t_1, t_4), (t_6, t_8)\})$ las transiciones t_1 y t_5 son permitidas en $m'_0 = (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1)$, pero

una vez que t_1 dispara t_3 no puede disparar. De hecho, los disparos sucesivos de t_1 y t_5 o de t_5 y t_1 conducen a la marcación $(0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$, la cual determina un estancamiento en el sistema.

Consideremos la red dada en la Figura 4. Aquí es tomado en cuenta únicamente el robot R_1 . Se puede verificar sin dificultad que $(l_9, \{(t_1, t_4), (t_6, t_8)\})$ es una 2-EM para esta red M que satisface las condiciones del comportamiento dinámico. Ahora bien, como fue mencionado anteriormente, si $(l_{10}, \{(t_2, t_4), (t_5, t_8)\})$ es añadida adecuadamente a la especificación del sistema entonces ella no determina una 2-EM satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico. Por lo tanto, la especificación del sistema es incorrecta para un diseño de red sin estancamiento. Sea la nueva especificación: La estación de trabajo E_1 solicita ambos robots al mismo tiempo.

Entonces, la RP marcada M' ilustrada en la Figura 5 captura esta nueva especificación.

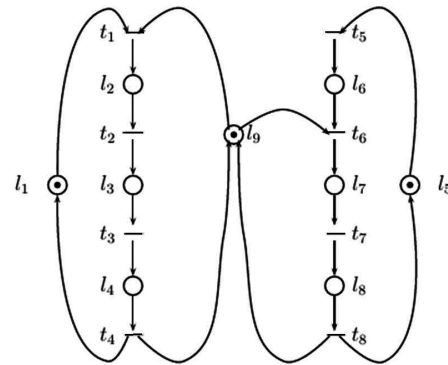


Figura 4: Una subred M de la RP marcada dada en la Figura 3.

Para la RP marcada M' dada en la Figura 5, sea la clasificación $L_o = \{l_2, l_3, l_4, l_6, l_7, l_8\}$, $L_f = \{l_1, l_5, l_9, l_{10}\}$ y $L_v = \emptyset$.

$(l_{10}, \{(t_1, t_4), (t_5, t_8)\})$ es una 2-EM para M' satisfaciendo las condiciones del comportamiento dinámico. En efecto, las condiciones 1) y 2) de la definición 1 son claras. Por otro lado, la condición 1') es satisfecha tomando m'_0 : aquí t_1 y t_5 son permitidas. Finalmente, como $L_v = \emptyset$ entonces basta considerar únicamente a m'_0 . De hecho, si t_1 dispara entonces $t_2 t_3 t_4$ es la única sucesión disparable;

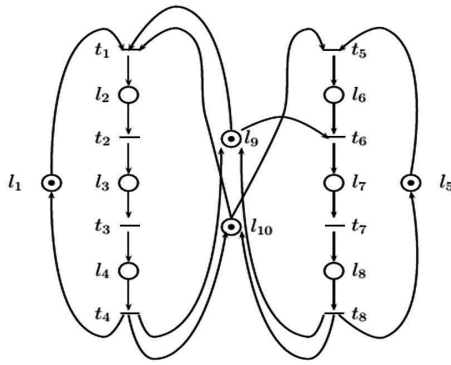


Figura 5: Una RP marcada M' representando un sistema de ensamblaje constituido por dos estaciones de trabajos y dos robots.

asimismo, si t_5 dispara entonces $t_6 t_7 t_8$ es la única sucesión disparable. Luego, la condición 2') se satisface. Por lo tanto, $(l_{10}, \{(t_1, t_4), (t_5, t_8)\})$ es una 2-EM para M' , la cual satisface las condiciones del comportamiento dinámico de la RP dada conteniendo dicha 2-EM.

Para concluir, usando las técnicas convencionales de análisis correspondiente a la RP marcada M dada en la Figura 4 tenemos que M es segura, no bloqueada y reinicializable. Así, como M es una subred de la RP marcada M' dada en la Figura 5, entonces desde los Teoremas 1, 2 y 3 sigue que la RP M' conteniendo la 2-EM $(l_{10}, \{(t_1, t_4), (t_5, t_8)\})$ que satisface las condiciones del comportamiento dinámico es segura, no bloqueada y reinicializable.

6. Conclusión.

Los resultados incluidos aquí, junto con la metodología para el diseño de redes de Petri en un medio ambiente de manufactura con recursos compartidos, permiten la detección de estancamiento durante el proceso de modelación. Esto es crucial desde el punto de vista de costo del diseño, sobre todo cuando el sistema es muy complicado. Justamente, uno de los principales objetivos de nuestro análisis es desarrollar métodos formales para sintetizar una red de Petri que garantice el cumplimiento de un conjunto dado de especificaciones o requerimientos y preserve algunas propiedades cualitativas. En este sentido, los argumentos teóricos presentados en este artículo

son muy útiles y permiten el manejo de sistemas complejos.

Agradecimiento.

Se hace especial agradecimiento al CDCHTA, ULA-Mérida por el financiamiento parcial de los proyectos de códigos: I-1442-15-02-ED y I-1441-15-02-ED, y al proyecto Eco-Nord: Automatización de Sistemas de Producción con supervisión autónoma y coordinación distribuida utilizando enfoque holónico N 201000302.

Referencias

- [1] James Lyle Peterson. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1981.
- [2] Tadao Murata. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580, 1989.
- [3] MengChu Zhou and Frank DiCesare. Parallel and sequential mutual exclusions for Petri net modeling of manufacturing systems with shared resources. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 7(4):515–527, 1991.
- [4] Guelvis Mata, Arnaldo Méndez, Juan José Cardillo Albarrán y Edgar Alfonso Chacón Ramírez. Modelación de exclusión mutua de sistemas de eventos discretos con redes de Petri. *Ciencia e Ingeniería*, 36(2):111–120, 2015.
- [5] MengChu Zhou and Frank Dicesare. A Petri net design method for automated manufacturing systems with shared resources. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, pages 526–531. IEEE, 1990.

Influence of the test parameters of sliding friction of a austenitic - ferritic stainless steel using methodologies Taguchi and Anova.

J. E. Romero C.*

Centro de Investigación en Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.-

In this article, the influence of independent control parameters of a tribometer such as normal load, sliding velocity and sliding time or distance in the sliding friction tests of a austenitic-ferritic stainless steel at ambient conditions using statistical analysis tools, are shown. The steel in study was characterized in surface properties such as roughness and hardness. Dry friction tests were performed on tribometer ball on ring type with an experimental design based on an orthogonal array of Taguchi. The friction coefficient resulted in average values from 0,213 to 0,891 for the evaluated conditions. With the techniques of statistical analysis as the ratio S/N and Anova, the significance of the control parameters friction test was determined on dry lubrication and optimum combination to minimize sliding friction was obtained. All parameters were statistically significant in the experiments, as well as their interactions. Of the three parameters assessed sliding distance proved to be the most influential parameter for dry sliding friction of the austenitic - ferritic stainless steel studied.

Keywords: sliding friction; duplex stainless steel; Taguchi method; tribology.

Influencia de los parámetros del ensayo de fricción por deslizamiento de un acero inoxidable auténtico-ferrítico usando las metodologías de Taguchi y Anova.

Resumen.-

El presente artículo se muestra la influencia de los parámetros de control independientes de un tribómetro, tales como carga normal, velocidad de deslizamiento y duración o distancia de deslizamiento, de ensayos de la fricción por deslizamiento de un acero inoxidable auténtico ferrítico en condiciones ambiente, usando herramientas de análisis estadístico. Se caracterizó el acero en estudio en cuanto a las propiedades de superficie como rugosidad y dureza. Se realizaron ensayos de fricción seca en tribómetro tipo bola sobre anillo con un diseño experimental basado en un arreglo ortogonal de Taguchi. El coeficiente de fricción resultó en valores promedio entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas. Con las técnicas de análisis estadístico como la razón S/N y Anova, se determinó la significancia de los parámetros de control del ensayo de fricción en lubricación seca y se obtuvo la combinación óptima para minimizar la fricción por deslizamiento. Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos en los experimentos, al igual que sus interacciones. De los tres parámetros evaluados, la distancia de deslizamiento resultó ser el parámetro más influyente para la fricción por deslizamiento en seco del acero inoxidable auténtico - ferrítico estudiado.

Palabras clave: fricción por deslizamiento; acero dúplex; método Taguchi; tribología.

Recibido: Diciembre 2015

Aceptado: Abril 2016

*Autor para correspondencia

Correo-e: joromer@uc.edu.ve (J. E. Romero C.)

1. Introducción

Los aceros inoxidable dúplex (austenítico-ferrítico) son atractivos como materiales en bioingeniería, siendo una alternativa para ser implantados, como elementos de fijación ortopédica, placas de huesos y en algunas prótesis, entre otros, gracias a su alta resistencia a la corrosión y bajos costos, en comparación con el acero inoxidable 316L y aleaciones de titanio, materiales preferidos en esta aplicación [1, 2]. Se han realizado muchas investigaciones acerca de los aceros inoxidable dúplex motivado a su constante desarrollo, alcanzando en la actualidad la cuarta generación [3]. Pocas de estas experiencias han sido en el campo de la tribología [4, 5, 6, 7, 8, 9], y por consiguiente, aún no se conoce suficientemente algunas de sus propiedades o comportamiento ante las sollicitaciones tribológicas, en particular su respuesta a la fricción.

El comportamiento friccional es afectado por una amplia lista de factores [10], como por ejemplo, la cinemática de las superficies en contacto y la aplicación externa de carga o desplazamiento, lo que indica que el coeficiente de fricción (COF) no es una propiedad del material. Para la comprensión del comportamiento friccional de los materiales se han planteado distintas teorías: el modelo de adhesión, el modelo de energía de superficie, modelo de deformación plástica, el modelo de rugosidad, el modelo combinado adhesión-surcado-rugosidad y el modelo deformación-surcado-adhesión [10]. Este último, demuestra una mejor correlación entre el COF teórico y el experimental [11].

El diseño experimental de Taguchi (DET) es una herramienta de análisis potente para modelar y analizar la influencia de diversos parámetros o factores de control en el comportamiento de la variable dependiente estudiada. Proporciona un enfoque sencillo, eficiente y sistemático para optimizar los factores de control del desempeño, la calidad y el costo. Este diseño experimental incluye tres etapas: la fase de planificación, la fase ejecución y la fase de interpretación. En la fase de planificación, se debe dar una importancia máxima a la identificación de los diversos factores de control. Después de la ejecución de los experi-

mentos, los datos son recogidos y analizados para determinar el efecto de varios factores de control en la respuesta del desempeño evaluado. Para reducir al mínimo el número, el costo y tiempo de los experimentos, este método generalmente usa un enfoque factorial fraccional y puede ser logrado con la ayuda de matrices ortogonales [12].

En el presente artículo se expone un estudio tribológico realizado a un acero auténtico-ferrítico (dúplex) para determinar el efecto o influencia de los parámetros de un ensayo de fricción por deslizamiento mediante el empleo de metodología de Taguchi y el análisis estadístico de datos. Se reportan los resultados de los ensayos desarrollados en especímenes de acero dúplex SAF 2507 sin tratamiento térmico en aire, sin lubricación y a temperatura, presión y humedad normal de un laboratorio.

2. Metodología Experimental

En esta sección se describe brevemente el material de los especímenes de prueba, la configuración experimental y las técnicas utilizadas para medir las variables seleccionadas.

2.1. Preparación de los especímenes

Las probetas o especímenes del acero inoxidable auténtico ferrítico (dúplex) tipo SAF 2507 se obtuvieron a partir de una barra tubular de 32 mm de diámetro externo, dicha barra se cortó en sección de 10 mm de ancho, luego se ensamblaron con un ajuste a presión en cilindros de bronce a fin de lograr instalarlas en el tribómetro disponible. En cuanto a la preparación, a los especímenes se le realizaron una limpieza con un baño ultrasónico, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie.

Las bolas utilizadas fueron de acero AISI 52100 de 6 mm de diámetro, obtenidas a partir de cojinetes disponibles comercialmente. Se seleccionó dicho material como contraparte por su elevada dureza, aproximadamente cuatro veces más duro que el acero en estudio. Estas bolas se extrajeron de su pista mediante el uso de un desarmador, luego de lo cual fueron limpiadas con acetona y alcohol en baño ultrasónico, a fin de eliminar la

capa de lubricante. Se empleó una bola diferente para cada espécimen.

2.2. Ensayo de rugosidad y dureza

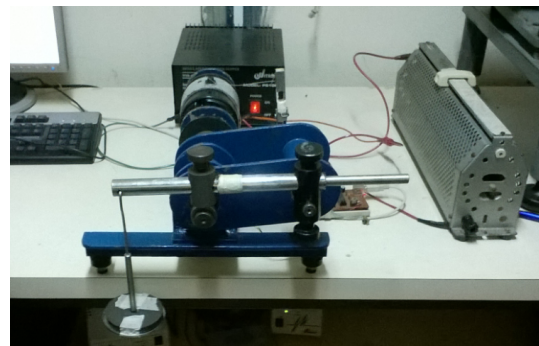
Se realizó una caracterización inicial del acero en estudio, al medir la rugosidad promedio, R_a , en sentido circunferencial, ya que este corresponde al sentido del movimiento, se utilizó un rugosímetro de punta de diamante. Igualmente, se midió la dureza en Rockwell B, en equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

2.3. Ensayo de fricción por deslizamiento

Los ensayos de fricción por deslizamiento se llevaron a cabo en un tribómetro tipo bola sobre anillo que se encuentra en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, el cual es un desarrollo propio [7, 13, 14], y su esquema se muestra en la Figura 1. Los parámetros que se pueden controlar en el tribómetro descrito son la carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia o tiempo de duración del ensayo. En cuanto al movimiento, en esta máquina el anillo de prueba se instala sobre el eje del equipo, por lo cual este es el elemento móvil, por su parte la bola se coloca en una porta-esfera directamente en la barra de carga, por lo que permanece estacionaria, resultando un movimiento giratorio de contacto lineal. Los datos referente a la fricción, se obtuvieron a partir del sistema automático de adquisición de datos y un programa desarrollado para este fin, el cual registró, la velocidad de giro, la carga normal, la fuerza de roce, el tiempo de ensayo y el coeficiente de roce, entre otros parámetros, a medida que se desarrolló cada experimento.

2.4. Diseño experimental de Taguchi

La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar los tres parámetros antes mencionados, carga normal, velocidad de deslizamiento y distancia para una aplicación biomédica y considerando las limitaciones del equipo de ensayo. Se pretendió simular las condiciones a las cuales



(a) Arreglo general del dispositivo



(b) Detalle de la geometría del contacto

Figura 1: Tribómetro tipo bola sobre anillo.

se someterían dispositivos ortopédicos de extremidades inferiores al andar, por ejemplo, en una prótesis de rodilla se puede verificar un esfuerzo máximo de aproximadamente $37MPa$ [15] y una velocidad tangencial relativa de $0,16m/s$ [16]. Estas condiciones no son posibles emularlas en el tribómetro seleccionado por sus bajas magnitudes, así que se optó por los parámetros y niveles mostrados en la Tabla 1, que puede permitir la comparación con otras investigaciones [4, 5, 7]. En cuanto a las pruebas, estas se realizaron en condiciones de lubricación seca y ambiente normales en laboratorio.

Tabla 1: Parámetros y niveles del ensayo de fricción por deslizamiento.

N°	Parámetro Nombre	Niveles		
		Bajo	Medio	Alto
1	Carga (N)	9	19	29
2	Velocidad (m/s)	0,9		2
3	Distancia (m)	500	1000	2000

Se desarrolló un diseño experimental basado en

la metodología de arreglos ortogonales de Taguchi (DET), debido a la limitación en la cantidad de material. El DET permitió optimizar las probetas disponibles y el análisis de la razón señal a ruido, S/N , determinar la influencia en los resultados de los parámetros seleccionados. El procedimiento general de la aplicación de la metodología DET se encuentra en [12]. Al aplicar esta metodología tomando como base los parámetros de ensayo se obtuvo la matriz ortogonal L9 la cual se presenta en la Tabla 2. Cada ensayo se realizó con una repetición para conocer la variabilidad en los parámetros seleccionados.

Tabla 2: Matriz de ensayos.

Experimento	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
1	9	0,9	500
2	9	2	1000
3	9	2	2000
4	19	0,9	1000
5	19	2	2000
6	19	0,9	500
7	29	0,9	2000
8	29	2	500
9	29	2	1000

2.5. Análisis estadístico de los datos

Una vez ejecutada la experimentación prevista en el diseño experimental y obtenidos los resultados para cada ensayo realizado, estos pueden ser utilizados para determinar el efecto de los parámetros y niveles en dichos resultados.

Para determinar la influencia de cada factor o parámetro en los resultados se cuenta con el análisis S/N , señal (nivel medio) a ruido (variación respecto a la media), el cual se calculó para cada experimento con el criterio “el nominal es el mejor”, llevado a cabo al aplicar las siguientes ecuaciones:

$$S/N_i = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_i^2}{S_i^2} \right)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{u=1}^{N_i} y_{i,u}$$

$$S_i^2 = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{u=1}^{N_i} (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2$$

Donde,

i : número de experimento,

u : número de prueba,

N_i : número de pruebas por experimento i .

Una vez calculados el número S/N para cada parámetro y nivel, se calcula el valor de rango $\Delta = S/N_{mayor} - S/N_{menor}$ del S/N de cada parámetro. A medida que este Δ sea mayor, mayor será la influencia del parámetro en el desempeño en evaluación.

Adicionalmente, se realizó una interpretación de los resultados experimentales por análisis de promedio y análisis de la varianza (Anova). El análisis Anova generalmente se realiza sobre resultados experimentales con el fin de identificar los parámetros de control que son estadísticamente significativos [17].

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización superficial de los especímenes estudiados

Una de las propiedades de superficie evaluadas del material en estudio fue la rugosidad, la cual se conoce que afecta la fuerza de fricción en su componente de rugosidad [10]. Los resultados de los ensayos de rugosidad reportaron un valor promedio, luego de cinco repeticiones, de $R_a = 0,1625 \mu m$ con desviación estándar de 0,01280. La norma ASTM G77-98 [18], tomada en referencia para esta evaluación, específica para anillo una rugosidad entre $0,152 \mu m$ a $0,305 \mu m$ en la dirección del movimiento. Como se puede notar la rugosidad promedio obtenida cumple con las especificaciones que indica la norma referida.

La otra propiedad de superficie evaluada fue la dureza del material en estudio, la cual se conoce que contribuye a la fricción en su componente de adhesión y surcado (“plowing”) [10]. El resultado del ensayo realizado en escala Rockwell B con una carga de $100 kg$ y cinco repeticiones, correspondió a un valor promedio de 95,94 con desviación estándar de 1,5143. Se aprecia que el acero SAF 2507 es un 9 % más duro que el acero inoxidable

austenítico ANSI 316L generalmente empleado en aplicaciones biomédicas.

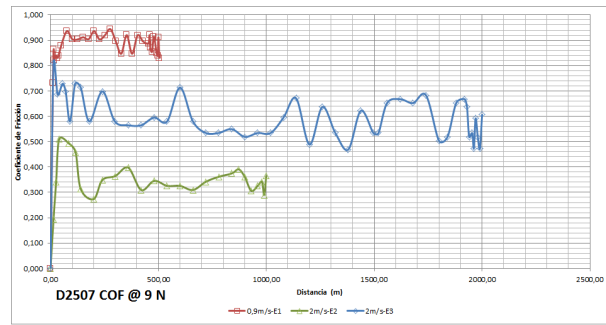
3.2. Respuesta del material evaluado a la fricción por deslizamiento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de fricción, COF, a partir del ensayo tribológico, siguiendo la norma ASTM G-77 modificada [7], donde se sustituyó el bloque por una esfera o bola, dado como resultado que el espécimen corresponde al anillo y la bola a la contraparte de fricción.

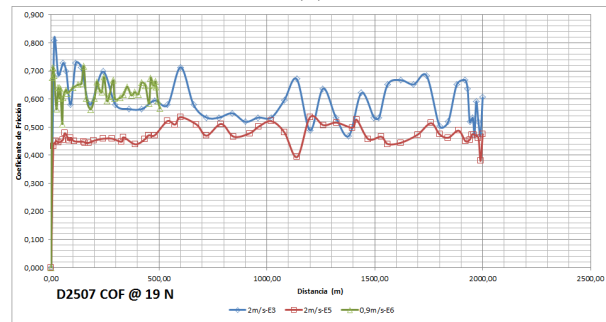
Se ejecutó la matriz de experimentos en el acero inoxidable dúplex SAF 2507 con la metodología descrita en la sección anterior. El tribómetro, arrojó mediante la captura del sistema de adquisición de datos, los valores del COF para las condiciones evaluadas en a intervalos de tiempo aproximadamente regulares. En la Figura 2 se presentan una serie de curvas de los resultados del COF en función de la distancia ensayada, cada gráfico muestra en línea continua, el valor promedio de las réplicas de cada experimento.

Al observar los gráficos (a), (b) y (c) de la Figura 2, del comportamiento general de la COF del acero SAF 2507, no se apreció un periodo estable definido, sino una serie periodos de transición a lo largo del recorrido, ya reportado en otras investigaciones para el acero dúplex [4, 5, 7], esto se atribuye a las velocidades seleccionadas (mayor a 0,8m/s), a la condición de superficie (baja rugosidad), a la severidad del contacto en la interface (un contacto lineal) y al mecanismo de desgaste predominante (delaminación). Por consiguiente, se consideró un régimen moderadamente estable, resolviendo tomar un promedio de todos los datos obtenidos como la respuesta de COF reportado para el acero evaluado. En la Tabla 3 se muestran los resultados para cada experimento logrado, donde los valores del COF promedio de los experimentos resultaron en entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas, lo cual se considera un comportamiento friccional de moderado a severo.

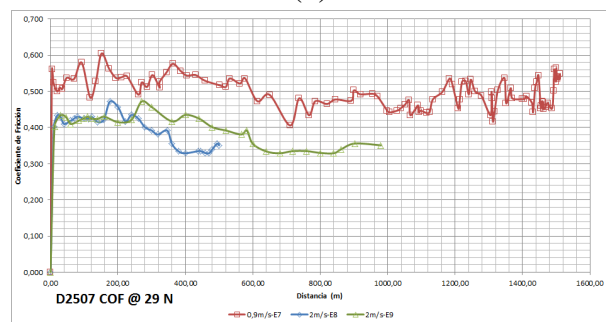
De los datos expuestos en la Tabla 3 se comprueba que el COF promedio es menor a medida que la carga normal aplicada es mayor a



(a)



(b)



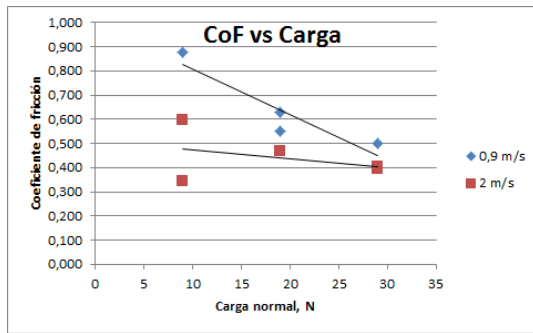
(c)

Figura 2: Resultados de COF de cada experimento en función de la distancia de deslizamiento.

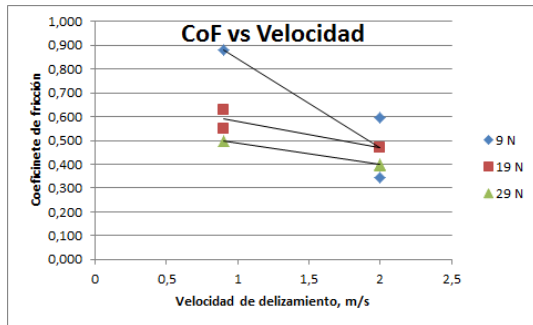
Tabla 3: Resumen de resultados para COF del SAF 2507.

Experimento	Evento A	Evento B	Promedio	Desviación
1	0,8911	0,8661	0,8786	0,0177
2	0,2126	0,4720	0,3423	0,1834
3	0,5681	0,6253	0,5967	0,0405
4	0,5748	0,5237	0,5492	0,0361
5	0,4463	0,4939	0,4701	0,0337
6	0,6118	0,6477	0,6298	0,0254
7	0,5332	0,4664	0,4998	0,0472
8	0,4017	0,3872	0,3945	0,0103
9	0,3914	0,4120	0,4017	0,0146

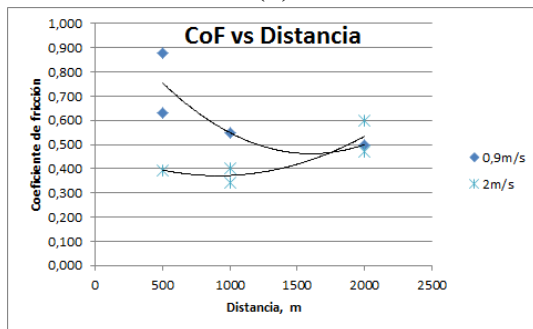
razón de un 29,05 % y disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento en una proporción de 39,33 %.



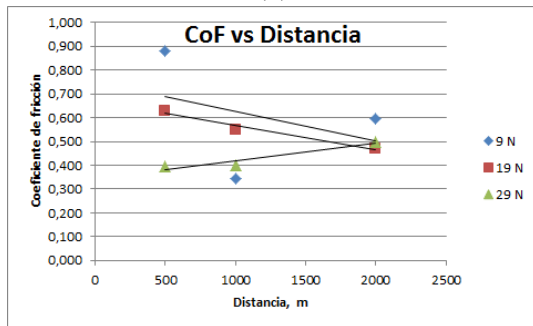
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: Respuesta de COF promedio en función de (a) la carga normal, (b) la velocidad de deslizamiento y (c) y (d) distancia de deslizamiento.

En la Figura 3, se muestra la respuesta de fricción por deslizamiento para el acero dúplex SAF 2507 considerando la carga, la velocidad o la

distancia como una constante. De la Figura 3 (a), al analizar el efecto de la carga normal evaluada considerando la velocidad como fija se observó, con excepción del experimento 2, que el COF de fricción disminuye a medida que la carga aumenta, es decir, a fuerza de fricción es proporcional a la carga normal, como se espera para la fricción seca de acuerdo a la teoría (1ra ley de Amontons-Coulomb). De los datos de la Tabla 3, se obtiene que los valores promedio del COF para 9N, 19N y 29N son, 0,606, 0,550 y 0,432, respectivamente.

De igual manera, al examinar la gráfica (b) de la Figura 3, se reseña el comportamiento de la fricción respecto a la velocidad de deslizamiento considerando la carga normal fija, se puede destacar que para todos los experimentos realizados con el acero dúplex SAF 2507 se obtuvo que el COF disminuye con el aumento de la velocidad tangencial, siendo entonces esta respuesta una excepción a la 3ra ley de Coulomb, que establece que la fuerza de fricción es independiente de la velocidad. De la Tabla 3, para la velocidad de deslizamiento de 0,9m/s y 2m/s, se tiene un COF promedio de 0,639 y 0,441, respectivamente.

Respecto al comportamiento de la fricción con la variación de la distancia, al observar las gráficas (c) y (d) de la Figura 3, no se logró determinar una tendencia definida. Para la velocidad de 0,9m/s, el COF promedio disminuye con la distancia, pero para 2m/s, el COF promedio aumenta. Por otro lado, para las cargas normales de 9N y 19N, el COF promedio disminuye, mientras aumenta para 29N a medida que la duración se incrementa. Esta respuesta variable respecto a la duración del ensayo del fenómeno de fricción, puede atribuirse a la interrelación de la fuerza de fricción con el desgaste, donde al cambiar la topografía de la superficie debida a la generación de desechos, la fuerza de fricción se ve afectada principalmente por un mecanismo de surcado de las partículas de desgaste [10].

3.3. Análisis estadístico de los parámetros de control del ensayo de fricción por deslizamiento

Análisis de Varianza. Al interpretar la información derivada del análisis de varianza (Anova 3^k), mostrado en la Tabla 4, resulta que en los

experimentos realizados todos los parámetros son estadísticamente significativos, al igual que sus interacciones.

Tabla 4: Análisis Anova para COF del SAF 2507.

Fuente de Variación	SS	df	MS	F test	P-value	F crit (95 %)
A (*)	0,312	2	0,156	49,213	$8,614 \times 10^{-7}$	3,80557
B (**)	0,397	1	0,397	125,244	$4,803 \times 10^{-8}$	4,66719
C (***)	0,078	2	0,039	12,233	$1,028 \times 10^{-3}$	3,80557
A x B	0,179	2	0,089	28,179	$1,877 \times 10^{-5}$	3,80557
A x C	0,454	4	0,113	35,768	$6,707 \times 10^{-7}$	3,17912
B x C	0,089	2	0,044	13,979	$5,760 \times 10^{-4}$	3,80557
Error	0,041	13	0,003			
Total	0,463	17				

(*): Carga

(**): Velocidad

(***): Duración

De los resultados de la Tabla 4, se observa que todos los valores de la probabilidad, P, son menor que 0,05 (nivel de significancia de 95 %). Primeramente, se tiene que el valor de P, para la “A” es el valor de P para el efecto en el COF al variar la carga normal. Puesto que el valor P es menor que 0,05, se establece que la respuesta a la fricción por deslizamiento del acero dúplex SAF2507 al variar la carga normal es significativamente diferente. Por lo tanto, la carga normal afectará el COF del material. De manera similar, se interpreta para “B” velocidad de deslizamiento y “C” la distancia recorrida. En segundo lugar, se deseaba saber si existe alguna interacción entre los factores, si hay interacción, no serán independientes unos de otros. Los valores de P para la “AxB”, “AxC” y “BxC”, es el valor de P para el efecto en el COF al variar los factores en combinación uno x otro. Puesto que el valor P es menor que 0,05 para la interacción, se puede señalar que las respuestas a la fricción obtenidas al realizar las interacciones, son significativamente diferentes y son independientes unas de otras. Para poder optimizar con eficacia la respuesta a la fricción por deslizamiento, se podría realizar prueba manteniendo constante dos de los parámetros y variar el tercero y viceversa, lo cual es ineficiente en costos y tiempo.

Razón Señal a Ruido- S/N. Como se expuso en la sección anterior, la metodología Taguchi pre-

senta un análisis que permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor influencia en los resultados de fricción de manera más eficiente. Los valores S/N calculados para los factores y niveles evaluados se muestran en la Tabla 5. Al observar el valor de posición, obtenido para cada parámetro, se destaca que el COF para el acero SAF 2507 se vió más afectado por la duración del ensayo, al mostrar una mayor proporción S/N , seguido de la velocidad de deslizamiento y menos influenciado por la carga normal, al ser este S/N el valor menor. Ahora para optimizar con eficacia la respuesta a la fricción por deslizamiento, se selecciona los niveles con el valor S/N mayor, logrando el COF con la mínima variación. Así que, el conjunto de parámetros seleccionado entre los evaluados es: una carga normal de 29N, una velocidad de deslizamiento de 2m/s y una distancia de 500m.

Tabla 5: Análisis S/N para COF del SAF 2507.

Nivel	Carga (N)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
1	20,676	105,920	93,506
2	17,245	111,488	57,194
3	23,289		66,708
Δ	6,045	5,568	36,312
Posición	3	2	1

4. Conclusiones

El acero SAF 2507 obtuvo un coeficiente de fricción promedio entre 0,213 a 0,891 para las condiciones evaluadas.

El coeficiente de fricción es menor a medida que la carga normal aplicada es mayor a razón de un 29,05 %, así mismo este disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento en una proporción de 39,33 % en promedio.

Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos y diferentes, así como sus interacciones.

La duración resultó ser el parámetro más influyente y la carga normal, el de menor influencia para el acero inoxidable auténico-ferrítico estudiado.

Agradecimiento

El autor desea expresar su especial agradecimiento a docentes, técnicos y auxiliares de investigación del Laboratorio de Materiales y del Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, UC, por su valiosa colaboración en la realización de las pruebas. Al Centro de Investigación de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UC, por el financiamiento parcial de este proyecto.

Referencias

- [1] A. Cigada, G. Rondelli, B. Vicentini, M. Giacomazzi, and A. Roos. Duplex stainless steels for osteosynthesis devices. *Journal of biomedical materials research*, 23(9):1087–1095, 1989.
- [2] L. Gómez. Estudio de biocompatibilidad del acero dúplex saf 2205. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2009.
- [3] TMR Stainless. *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*. International Molybdenum Association, Pittsburgh, PA, USA, primera edición, 2012.
- [4] G. Straffelini, A. Molinari, and D. Trabucco. Sliding wear of austenitic and austenitic-ferritic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(3):613–624, 2002.
- [5] G. Szyndelman. Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España, 2008.
- [6] J. Renedo. Comportamiento al desgaste por deslizamiento en aceros inoxidables: ferrítico, austenítico, dúplex y martensítico. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España, 2010.
- [7] L. Medina y G. Peralta. Evaluación de las propiedades tribológicas del acero dúplex. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2010.
- [8] J. E. Romero. Determinación del comportamiento ante el desgaste por frotamiento del acero dúplex SAF 2507 usando un diseño experimental Taguchi. *Revista Ingeniería UC*, 21(2):16–26, 2014.
- [9] M. Anglada, G. Fargas, A. Mestra, and A. Mateo. Sliding wear behavior of a duplex stainless steel. In *Mechanical Properties of Solids XI*, volume 423 of *Key Engineering Materials*, pages 125–130. Trans Tech Publications, 3 2010.
- [10] N. Suh. *Tribophysics*. Prentice-Hall, 1986.
- [11] N. Suh and H. Sin. The genesis of friction. *Wear*, 69(1):91–114, 1981.
- [12] R. Roy. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [13] K Turkintong. Diseño y fabricación de una máquina de ensayo de roce. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1980.
- [14] C. Gloriet. Desarrollo del sistema de medición y control de un tribometro tipo bloque en anillo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2012.
- [15] R. Rodríguez, G. Urriolagoitia Sosa, C. Torres, L. Hernandez y G. Urriolagoitia Calderón. Análisis numérico sobre esfuerzos y áreas de contacto en una PTR Scorpio II® Stryker®. Base para el diseño de PTR personalizada al fenotipo Mexicano. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XV(1):28–41, Julio 2013.
- [16] C. Vaughan, B. Davis, and J. O'Connor. *Dynamics of Human Gait*. Kiboho Publishers, Howard Place, Western Cape 7450, South Africa, second edition, 1999.
- [17] W. DeCoursey. *Statistics and Probability for Engineering Applications With Microsoft® Excel*. Elsevier Science, 2003.
- [18] ASTM. ASTM G77-98, Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test, 1998.

Unconventional methods for fault diagnosis in distribution transformers

María Gabriela Mago^a, Luis Vallés^b, Jhon Jairo Olaya^{*,c}, Nestor Escudero^d

^aDepartamento de Ponencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bDoctorado en Ingeniería, Área de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^cPostgrado en Materiales y Procesos, Doctorado en Ciencias de los Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

^dMaestría en Matemática Física, Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela

Abstract.-

The purpose of this research is to perform troubleshooting of equipment as part of the distribution network, among which are single phase transformers pole through special methods. Diagnosis was supported such experimental tests for evaluating the lifetime of these devices have, so that, increase the qualification expertise probable failures. The information for the development of this research was provided by companies whose areas served belong to CORPOELEC (Valencia–Venezuela) and Codensa (Bogota–Colombia). It was concluded that the required investments in this sector are postponed, therefore, we recommend the implementation of maintenance programs in the short, medium and long term immediately.

Keywords: unconventional methods; fault diagnosis; factor and discriminant analysis; reliability

Métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en transformadores de distribución

Resumen.-

El propósito de esta investigación es realizar el diagnóstico de fallas de los equipos que forman parte de las redes de distribución, entre los cuales se encuentran, los transformadores de monofásicos de poste a través de métodos especiales. Tal diagnóstico se apoyó en ensayos experimentales, para evaluar el tiempo de vida útil que tienen estos equipos, de tal manera que, aumente la experticia de calificación de fallas probables. La información para el desarrollo de esta investigación fue suministrada por empresas cuyas áreas servidas pertenecen a Corpoelec (Valencia-Venezuela) y Codensa (Bogotá-Colombia). Se concluyó que las inversiones requeridas por este sector son impostergables, por lo tanto, se recomienda la implementación de programas de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo de manera inmediata.

Palabras clave: métodos no convencionales; diagnóstico de fallas; análisis factorial y discriminante; confiabilidad

Recibido: diciembre 2014

Aceptado: diciembre 2015

1. Introducción

Las redes de distribución de energía eléctrica son de vital importancia para los usuarios resi-

denciales e industriales, las condiciones de calidad y eficiencia energética son fundamentales para el desarrollo del sector eléctrico nacional, además de ser una de las líneas estratégicas del país. Dentro de esas redes de distribución, se encuentran los transformadores de distribución [1].

Untransformador es una máquina eléctrica, que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo

*Autor para correspondencia

Correo-e: jjojyaf@unal.edu.co (Jhon Jairo Olaya)

la frecuencia. Está constituido básicamente por una parte activa, la cual es el corazón del transformador. En esta sección es donde se transforman las tensiones y corrientes, está conformada por el núcleo y las bobinas (estas se devanan sobre el núcleo). El núcleo se construye con láminas de acero al silicio (3.15 %) de granos orientados, lo que permite una densidad mayor de flujo magnético. El espesor usual de la chapa de acero al silicio es de 0.35 mm. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios, según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión [2]. Se consideran transformadores monofásicos de distribución aquellos con capacidad nominal de 10 a 167.5 kVA de acuerdo a la norma venezolana. Si la capacidad es mayor de 500 kVA, se consideran transformadores de potencia. En el trabajo de Mago y colaboradores [3] se muestran algunas partes constitutivas del núcleo del transformador de distribución.

Como todo equipo, los transformadores están sujetos a diferentes fenómenos que pueden causar deterioro en los mismos, ocasionando así, numerosas fallas en los sistemas [4] y a pesar de su importancia en la red, son escasas las políticas de mantenimiento que reciben, solo son tomados en cuenta cuando se dañan por completo, y ameritan reemplazo inmediato para solventar la suspensión del servicio eléctrico, que se convirtió en una emergencia. No existe una evaluación de la vida útil o remanente, por lo tanto esta investigación se orienta hacia la aplicación de métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en transformadores, que complementaran las técnicas utilizadas hasta ahora [5], permitiendo el avance hacia mejores programas de mantenimiento en las empresas del sector eléctrico.

2. Tipo de fallas en transformadores de distribución

Existe una clasificación de los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución [6, 7], las cuales se indican a continuación:

- **Térmicas:** ocurren cuando la temperatura de trabajo excede la establecida por el fabricante,

ocasionando degradación del aceite dieléctrico de manera progresiva, lo que trae como consecuencia; el deterioro del equipo por efecto de una sobrecarga.

- **Arco Eléctrico:** ocurren, cuando fallan las protecciones del transformador, lo que trae como consecuencia, cortocircuitos internos que dañan el equipo, dejando esa parte de la red eléctrica fuera de servicio.
- **Descargas Parciales:** son pequeñas descargas eléctricas, que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio aislante sólido o líquido. En los transformadores de distribución están asociadas a condiciones de sobretensión ocasionando daños en el aislamiento del equipo.

3. Relacionadas con métodos no convencionales

3.1. Ensayos no destructivos

Los Ensayos No Destructivos (también llamados END, o en inglés NDT (*nondestructive testing*)) son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Dentro de los tipos de ensayos no destructivos que fueron realizados a los transformadores de distribución se encuentran los indicados a continuación, los cuales permiten detectar en los materiales de fabricación (chapa de acero al silicio específicamente), posibles discontinuidades superficiales y subsuperficiales [8].



Figura 1: Imanación por electrodos de la chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante

En la Figura 1 se muestra la imantación por electrodos de la chapa de acero al silicio al momento de aplicar corriente magnetizante.

3.2. Pruebas de tensión Mecánica

Las propiedades mecánicas son aquellas que para su determinación y medida, requieren de la aplicación de una fuerza exterior. El papel aislante utilizado en la fabricación de estos equipos, posee características técnicas bastante específicas, sin embargo, cuando es sometido a un proceso de falla por distintas causas es significativo evaluar el cambio en algunas de sus propiedades entre las cuales se encuentra la “Resistencia a la tensión”, que consiste en una prueba de estiramiento del papel que sirve de muestra, cuya probeta ha sido preparada previamente según indica el Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus o método (ASTM D-828) [9]. Mediante el ensayo de tensión mecánica, se caracteriza la respuesta del material ante una deformación continua unidireccional. La muestra, de dimensiones preestablecidas, es tensionada hasta llegar al punto de fractura. Durante todo el proceso, se realiza un registro de la carga aplicada, F , y la deformación sufrida instantánea, A . A partir de estos datos, se realiza la representación de la denominada tensión mecánica, s , frente a la deformación e , donde ambos parámetros se calculan como se indica en las Ecuaciones 1 y 2.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}, \quad (1)$$

$$f = \frac{F}{A_0}, \quad (2)$$

donde l_0 es la longitud inicial de la muestra, l_f es la longitud final tras la aplicación de la deformación y A_0 es el área inicial de la sección, la deformación verdadera ε está definida como el cambio instantáneo de longitud de la muestra dl entre la longitud instantánea l ,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} d\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \log 1 + e. \quad (3)$$

La Ecuación 3 permite la definición de la deformación verdadera, σ

$$\sigma = \frac{F}{A_f} = s \exp(\varepsilon).$$

A partir del registro y representación de estos datos, se obtienen los siguientes parámetros de caracterización mecánica del material que fueron marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda:

1-1 Muestra Patrón.

1-2 Muestra de papel aislante de transformador fallado por humedad.

1-3 Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo.

1-4 Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo en la bobina de alta tensión.

1-5 Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobretensión.

1-6 Muestra de papel aislante de transformador fallado por defecto de operación.

1-7 Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobrecarga.

1-8 Muestra de papel aislante de transformador de control de casi treinta (30) años.

Tabla 1: Características técnicas del papel aislante

Resistencia a la tracción longitudinal (N/mm ²)	Resistencia a la tracción transversal (N/mm ²)	Alargamiento a la rotura longitudinal (%)	Alargamiento a la rotura transversal (%)
70–100	50–60	3–5	7–10

Fuente: www.c-ursosos.ci

La Tabla 1 muestra las características técnicas de este papel aislante tipo presspan clase térmica B (130°C) aportadas por el fabricante, que permiten comparar los resultados gráficos de los ensayos realizados a los mismos.

3.3. Análisis metalográfico de los materiales de fabricación

El análisis metalográfico, consiste en observar en el microscopio, probetas pulidas utilizando reactivos apropiados, permiten deducir la historia

térmica del metal. La Figura 2 muestra la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación.



Figura 2: Preparación de las probetas para las muestras de transformadores fallados

4. Cálculo de confiabilidad

Las fallas están clasificadas según los meses de ocurrencia de las mismas. Los tiempos entre fallas (TEF) deben ser ordenados en orden ascendente (de menor a mayor) y listado en forma consecutiva en la columna T(N) (ver planilla de análisis de fallas).

En el caso de dos observaciones con el mismo valor, se debe determinar la medida geométrica de los números de igual orden

$T(N)$ = tiempo de sobrevivencia,

entonces $M(N) = N$,

donde $M = \sqrt{N_i - N_j}$,

N_i y N_j indican rangos menores y mayores respectivamente.

El rango $M(n)$ se usa para determinar la probabilidad de falla $PF(t)$, de acuerdo a

$$PF(t) = \frac{M(n)}{N_{\text{máx}} + 1,0}$$

Para cada rango se calcula la probabilidad de supervivencia. Con el método de mínimos cuadrados, a partir de esta función de sobrevivencia se pueden estimar los valores teóricos de V y K , el $TPEF$ (tiempo promedio entre fallas) o $MTEF$ [10]

$$V = \exp\left(\frac{N \sum_{i=1}^n Z_i b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n Z_i b_i \sum_{i=1}^n b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i^2}\right)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i b_i}{\sum_{i=1}^n b_i - \log V \times \sum_{i=1}^n b_i^2}$$

$$TPEF = V * \left(1 + \frac{1}{K}\right)$$

5. Metodología

Se diseñó un instrumento de recolección de datos para la empresa venezolana, que busca obtener referencias generales de las unidades falladas tales como: marca, capacidad, nivel de tensión, fecha de fabricación, carga probable, causa por la cual fue cambiado, aspecto exterior, descripción de posibles causas de fallas, etc [11]. La empresa colombiana que proporcionó la información, utiliza un instrumento similar dentro de sus normas y procedimientos de calidad, que sirvió también para esta recolección de datos. La Tabla 2 muestra las empresas que suministraron la información para este estudio.

Tabla 2: Muestra de las empresas y equipos fallados

Ubicación	Empresa	Nº de equipos fallados
Venezuela	Corpoelec	111
Colombia	FYR Ingenieros C.A	129

6. Procedimiento experimental y resultados obtenidos

6.1. Ensayos con líquidos penetrantes

Las muestras de chapas de acero al silicio de equipos fallados fueron preparadas para realizarles ensayos no destructivos, de acuerdo al Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination o método (ASTM E165-95) [12], para la aplicación del ensayo utilizando líquidos penetrantes, se realizó el procedimiento establecido para tal fin, no apreciándose en las muestras analizadas ninguna discontinuidad superficial [13].

6.2. Ensayos con partículas magnéticas

Luego de llevar a cabo lo indicado anteriormente a las muestras de las chapas de acero al silicio de los equipos fallados, se les realizó otro END utilizando el Standard Guide for Magnetic Particle Examination o método (ASTM E709-01) [14], aplicando el procedimiento establecido para evaluar discontinuidades superficiales y subsuperficiales con partículas magnéticas, no encontrándose en los materiales evaluados ninguna alteración o cambios en los mismos [15].

Este procedimiento experimental fue realizado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

6.3. Análisis Metalográfico

A través del método de análisis “Espectrofotometría de Absorción Atómica”, a una muestra patrón de chapa magnética, utilizada en la construcción del núcleo para transformadores, suministrada por la empresa venezolana Transformadores del Centro C.A, se identificó de una manera cuantitativa la composición química de los elementos presentes, en la Tabla 3, se indican los mismos.

Tabla 3: Composición química de la chapa magnética de silicio venezolana (muestra patrón)

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,08	0,012	0,015	0,002	2,90

Fuente: Y. Raffoul y I. Leal [16]

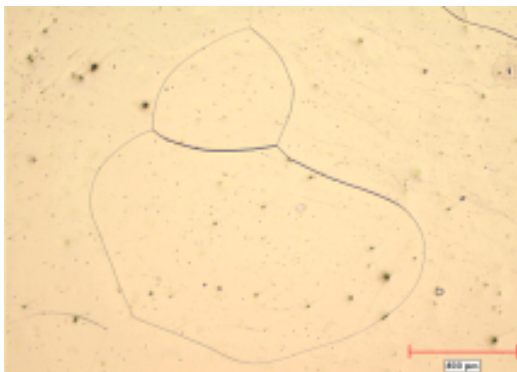


Figura 3: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio 1000X (cara transversal)

Esta muestra del acero al silicio fue preparada metalográficamente y atacada con Nital al 3% (3% de ácido nítrico diluido en 97% de alcohol etílico) donde, en la cara transversal (Figura 3) la micro estructura del material es observada bajo aumento y se evidencia la presencia de granos de ferrita e inclusiones/precipitados en la matriz.

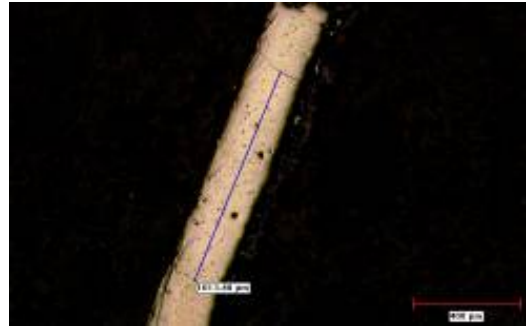


Figura 4: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal)

En la cara longitudinal (ver Figura 4) al igual que en el corte transversal, se observan granos de gran tamaño y mucha porosidad (se estima que ésta es consecuencia del ataque químico realizado al material).

El Silicio por estar en porcentaje superior a 2,5% hace que el acero estudiado sea ferrítico. Esta circunstancia es favorable, ya que estos aceros son de grano grosero con tendencia a que el grano aumente en los sucesivos calentamientos a que se somete el material, lo cual es una ventaja, ya que con ello se reducen las pérdidas por histéresis [16]. Estos ensayos fueron realizados en la Escuela de Química y Mecánica respectivamente, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Carabobo en Venezuela.

Tabla 4: Composición química de la chapa magnética de silicio colombiana (muestra patrón)

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,1472	0,0773	0,0391	0,0686	2,547

Fuente: Y. Raffoul y I. Leal [16]

Luego, se repite el procedimiento anterior identificándose de una manera cuantitativa, la composición química de los elementos presentes, a una

aleación suministrada por la empresa colombiana, FYR Ingenieros C.A , en la Tabla 4 se indican los mismos

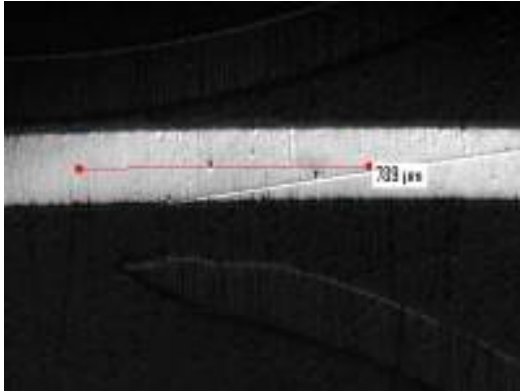


Figura 5: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Defecto de Operacion 100X. (cara longitudinal).

Los ensayos para evaluar impurezas y tamaño de grano, fueron realizados a las muestras correspondientes de chapas de acero al silicio de equipos fallados, (utilizados de referencia en la presente investigación), en los laboratorios de metalografía, de la Facultad de Ingeniería, Postgrado en Materiales y Procesos de Fabricación, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. La Figura 5 muestra los resultados de una de las muestras, que presentan las inclusiones o impurezas de dichos materiales, versus la condición de falla.

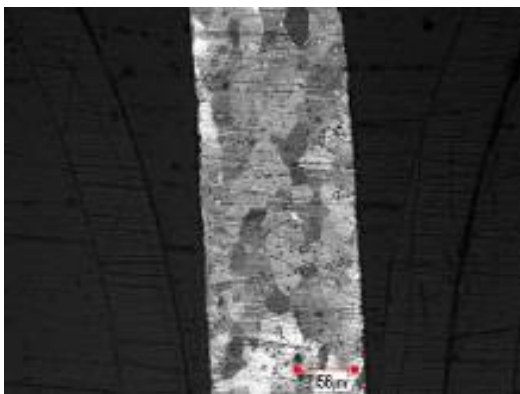


Figura 6: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal) del transformador de control 100X

Las muestras de acero al silicio de los transformadores fallados fueron preparadas metalográficamente y atacadas con 100 cm³ de ácido clorhídrico

(HCL), 3 cm³ de ácido nítrico (HNO₃) y 100 cm³ de agua regia en alcohol, dado que el reactivo utilizado con Nital al 3 %, no produjo ningún cambio en los materiales de los transformadores suministrados por las empresas colombianas. Este ataque químico se realizó en distintas oportunidades, logrando respuesta a la reacción solamente, en la chapa de acero al silicio del transformador de control, suministrado por la Empresa venezolana Transformadores del Centro, C.A, como muestra la Figura 6.

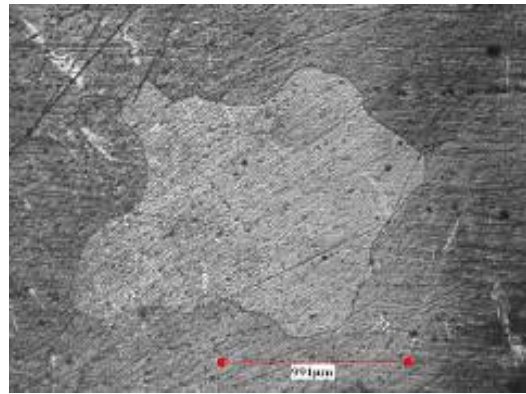


Figura 7: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por sobrecarga 50X (cara transversal)

Por lo tanto, se preparó otro reactivo que contiene 10 ml (HNO₃) (ácido nítrico) y 90 ml (CH₃OH) (etanol), utilizando un algodón y aplicando el mismo por espacio de tres (03) minutos en la probeta, se obtuvo el tamaño de grano 1 indicado en la Figura 7 [17, 18].

Inclusión o impurezas y tamaño de grano en los devanados de alta y baja tensión de los transformadores fallados. (ver Figuras 8 y 9)

Las muestras de bobinas tanto de alta como de baja tensión de equipos fallados, están “limpias” y no muestran mayores inclusiones o impurezas en las mismas.

El ataque químico realizado a las probetas preparadas de bobinas de alta y bobinas de baja tensión de muestras de equipos fallados, permite apreciar el tamaño de grano y los cambios presentados bajo la condición de falla. En la Figura 10, el tamaño de grano en la bobina de un transformador fallado por cortocircuito externo.

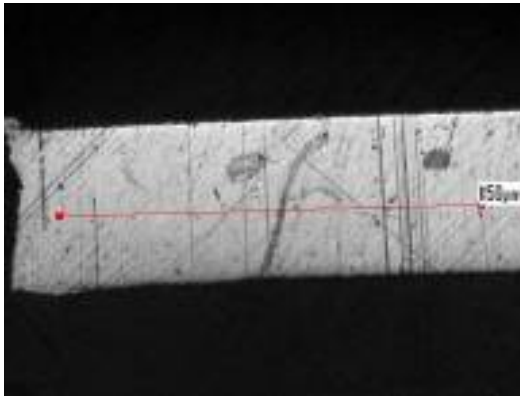


Figura 8: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal)

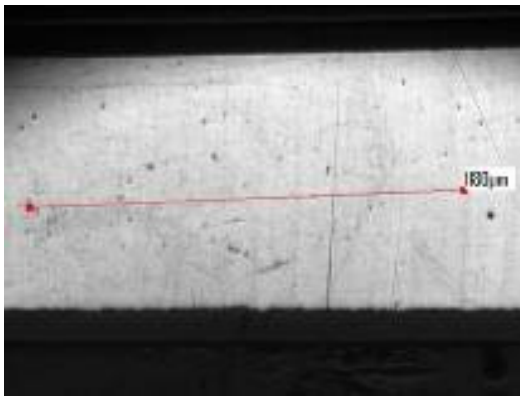


Figura 9: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal)

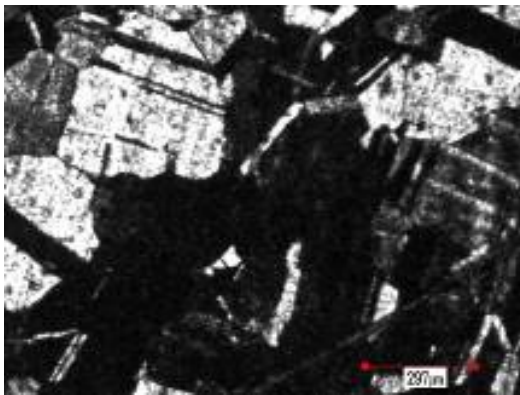


Figura 10: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por cortocircuito externo

Se observan tamaños de grano “finos”, a pesar de que no se puede comparar el tamaño en referencia con la norma ASTM E112–96 o

Standard Test Methods for Determining Average Grain Size [19], porque la fotomicrografía se hizo a 250X (aumentos), pero lo que corresponde a los resultados obtenidos, permite evaluar que las condiciones de alta temperatura como es el caso de los equipos utilizados en la presente investigación, producen difusión, y si hay difusión, el grano crece y por consiguiente; son menores las pérdidas, lo cual se cumple, para este tipo de material [20].

6.4. Ensayos de tensión mecánica del papel aislante

De los resultados obtenidos se observa, que las muestras de papel aislante de los transformadores fallados por sobretensión (1-5) y humedad (1-2) se encuentran dentro de los niveles que indica el fabricante en cuanto a las características de la norma que establece entre 3–5 % de deformación, aunque el nivel de carga máximo es alto para el fallado por humedad, no así, para el fallado por sobretensión. Los transformadores fallados por defecto de operación (1-6), sobrecarga (1-7), cortocircuito externo en alta tensión (1-4) e incluso la muestra de papel aislante del transformador de control (1-8), no están dentro de los niveles anteriores, pero en algunos casos es muy baja o sobrepasa la relación del nivel de carga máxima. La Figura 11 muestra los resultados obtenidos.

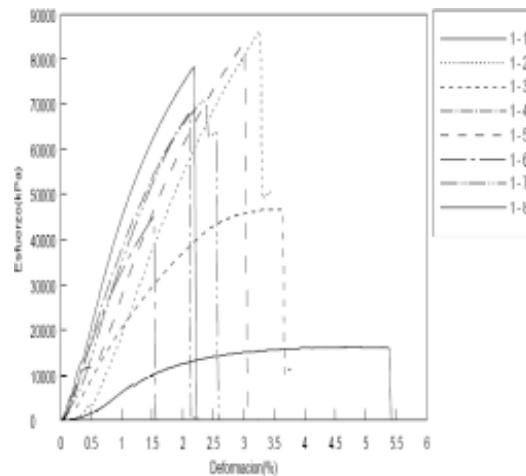


Figura 11: Resultados obtenidos de los ensayos de tensión de todas las muestras de papel aislante

7. Conclusiones

Esta investigación contribuye con el desarrollo tecnológico de Venezuela y Colombia, abriendo paso a una nueva área de especialización donde, ingenieros eléctricos, mecánicos y de materiales, se apoyarán en sus experticias y análisis técnicos, a fin de comprender los fenómenos eléctricos, magnéticos y mecánicos que definen el comportamiento de los transformadores de distribución, lo cual permitirá evaluar la vida remanente o útil aumentando la experticia en el análisis de fallas. A continuación se indican las conclusiones obtenidas en la presente investigación:

Los ensayos no destructivos o END practicados a las muestras de equipos fallados, no revelaron en las chapas de acero al silicio que forman el núcleo del transformador monofásico, ninguna discontinuidad superficial y subsuperficial, que indique deterioro en la calidad del material, producto de alguna causa de falla.

Las pruebas de tensión mecánicas indican envejecimiento o deterioro del papel aislante del equipo en estudio por tiempo de servicio, lo cual permitiría establecer la vida remanente o útil de los transformadores de distribución, es sin duda, una técnica importante en el diagnóstico de fallas de estos equipos. Se recomienda su aplicación en modelos estocásticos para predicción de fallas.

De las imágenes observadas cuando se evalúa impurezas en las chapas de acero al silicio se puede concluir, que ninguna falla modifica la microestructura del material de los transformadores utilizados de referencia en la presente investigación. De la microscopía tanto transversal como longitudinalmente, se observó el tamaño del grano de acuerdo a la norma ASTM E112-96 o Standard Test Methods for Determining Average Grain Size es de aproximadamente 2 en la chapa de acero al silicio del transformador de control suministrado por la empresa venezolana.

De la microscopía transversal se observó que el tamaño del grano de acuerdo a la norma ASTM E112-96 o Standard Test Methods for Determining Average Grain Size es de aproximadamente 1 para las chapas de acero de los transformadores fallados utilizados de referencia en la presente investiga-

ción suministrados por la empresa colombiana.

En el caso de Venezuela se recomienda revisar toda la red eléctrica, ya que esta condición indica, que los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, deben aplicarse de inmediato. Hay alteraciones en el suministro de energía eléctrica de forma imprevista. Las inversiones que requiere el sistema eléctrico, son impostergables. Es muy baja la confiabilidad de los equipos.

En el caso de Colombia se puede concluir que los equipos tienen una tasa de falla constante o también conocida como “operación normal”. Esta condición indica, que se están cumpliendo los programas de mantenimiento preventivo, sin embargo, se podría presumir, que algunos factores ambientales, inciden en las condiciones de funcionamiento, incrementando la probabilidad de ocurrencia de falla. Los costos indirectos para los usuarios de estas redes de distribución eléctrica, son elevados. Debe mejorarse la frecuencia de inspección en los programas de mantenimiento preventivo.

Referencias

- [1] Diego Stronconi y José Tamoy. Plan de mantenimiento correctivo-preventivo de los transformadores de distribución de la empresa elebol c.a, bolívar-estado bolívar. Trabajo final de grado, Escuela de Ciencias de la Tierra, Departamento de Ingeniería Industrial. Núcleo Bolívar, Universidad de Orientes, Ciudad Bolívar, Bolívar, Venezuela, octubre 2010.
- [2] EE Staff del MIT, editor. *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Reverté, Buenos Aires, Argentina, 1982.
- [3] MG Mago, Luis Vallés, Jhon-Jairo Olaya y Martha Zequera. Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando ensayos no destructivos y pruebas de tensión mecánicas. *Revista INGENIERÍA UC*, 18(2):15-26, agosto 2011.
- [4] A. Bossi. *Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de usuarios y Fabricantes*. Mc Graw Hill, Madrid, España, 1998.
- [5] James F Shackelford. *Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 3ra edición, 1992.
- [6] CADAPE. Normas para transformadores de distribución. Technical report, CADAPE, 1979.
- [7] Juan Mota y Ely Contreras. Problemática de los transformadores sumergidos en aceite. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica,

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1985.

- [8] A. Forero. *Metalografía Práctica*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2003.
- [9] ASTM International. *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus (ASTM D-828)*.
- [10] José Domingo Nava. *Teoría de mantenimiento: fiabilidad*. Consejo de Publicaciones, Universidad Los Andes, Mérida, Venezuela, 2002.
- [11] María Gabriela Mago Ramos, Luis Valles Defendine, Jhon Jairo Olaya Florez, *et al*. Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando el software estadístico spss (statistical package for the social sciences). *Ingeniería e Investigación*, 32(2):40–45, 2012.
- [12] ASTM International. *Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination (ASTM E165-95)*.
- [13] William Smith. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Mc Graw Hill, Madrid, España, 3ra edition, 1998.
- [14] ASTM International. *Standard Guide for Magnetic Particle Examination (ASTM E165-95)*.
- [15] (American Society for Metals). *Metal Handbook. "Atlas of Microstructures of industrial alloys ASM"*, 8va edition, 1972.
- [16] Yamile Raffoull y Irvin Leal. Estudio de la factibilidad técnica económica de la fabricación de la chapa de acero al silicio. Trabajo especial de grado, Escuelas de Eléctrica y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2006.
- [17] MG Mago, L. Hurtado, Y. Raffoul y I. Leal. Estudio de la chapa de acero al silicio para el núcleo del transformador monofásico. *Revista Ingeniería UC*, 16(2):65–69, agosto 2009.
- [18] Robert Reed-Hill. *Principios de metalurgia física*. C.E.C.S.A., México, 6ta edition, 1976.
- [19] ASTM International. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (ASTM E112-96)*.
- [20] MG Mago, L. Valles y J. Olaya. Evaluación metalográfica de la chapa de acero al silicio y de los devanados del núcleo del transformador monofásico bajo condición de falla. *Revista Ingeniería UC*, 18(3):51–63, diciembre 2011.

Design of a biomechanics prosthesis for child

Brizeida Gámez^{*,**,a}, Carlos Flores^b, Franklin Cabrera^b, Javier Cabrera^b

^a*Proyecto Prometeo SENESCYT, Unidad Académica de Ingeniería de Sistemas, Eléctrica y Electrónica, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador*

^b*Unidad Académica de Ingeniería de Sistemas, Eléctrica y Electrónica, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador*

Abstract.-

The design of a biomechanics prosthesis for right hand whose dimensions and weight allow its adaptation to children over 8 years and adolescents, is presented. Each finger is disposed in two sections, a fusion of the middle and distal phalanx, and a proximal phalanx articulated to the hand palm. The angles of the movement for the extension and flexion of all fingers, except the thumb, are controlled by a link located sideways. The drive system, which generates three degrees of freedom, is based on three linear actuators located in the palm, led by an Arduino microcontroller and activated by a voice recognition system to execute the cylindrical grasp's functions, the precision grasp, hook prehension and the extended index finger, is based on three linear actuators located on the palm, which have a reference potentiometer that provides its position, such indication is used by the microcontroller via the analogic input signal. To validate the design, a stresses and displacements analysis, and the determination of the safety factor that offers the device for the selected materials is carried out, using a computer program based on the Finite Element Method. The results obtained show a light prosthetic device that weights 200 grams, and can operate safely allowing four grip functions with the normal angles of the hand.

Keywords: biomechanics; child prosthesis; multigrasp; hand prosthesis; voice recognition

Diseño de una prótesis biomecánica para niños

Resumen.-

Se presenta el diseño de una prótesis de mano biomecánica (mano derecha) cuyas dimensiones y peso permiten su adaptación a niños mayores de 8 años y adolescentes. El modelo consta de una palma de mano articulada a la falange proximal y ésta última conectada a la falange media- distal. Los ángulos de movimiento, para la flexión y extensión de todos los dedos, excepto el pulgar, son controlados por un mecanismo independiente ubicado lateralmente. El sistema motriz, que genera tres grados de libertad, está basado en tres actuadores lineales ubicados en la palma, dirigidos por un microcontrolador Arduino y activado por un sistema de reconocimiento de voz, para hacer posible las funciones de prensión cilíndrica, pinza fina y la extensión del índice para permitir el contacto con pantallas táctiles. Para verificar las condiciones de operación el diseño se sometió a un análisis de esfuerzos, desplazamientos y la determinación de la condición de seguridad que ofrece el dispositivo para el material seleccionado, empleando un programa computacional basado en el Método de Elementos Finitos. Los resultados obtenidos reportan un dispositivo protésico de hasta 200 gramos de peso que puede funcionar sin inconveniente bajo condiciones normales de operación, y permite múltiples funciones de prensión.

Palabras clave: biomecánica; multiprensión; prótesis para niños; prótesis de mano; reconocimiento de voz.

Recibido: septiembre 2015

Aceptado: abril 2016

*Permanent Address: Centro de Biomecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

** Autor para correspondencia

Correo-e: bgamez@uc.edu.ve (Brizeida Gámez)

1. Introducción

La mano del hombre es una herramienta capaz de ejecutar innumerables acciones gracias a sus funciones de prensión, pinza y además por el hecho de ser un receptor sensorial por excelencia [1]. Este importante órgano puede perderse por la presencia de alguna enfermedad congénita, tumores malignos, infecciones, accidentes o como consecuencia de heridas que comprometan el miembro [2], y generan la necesidad de amputarlo. Las amputaciones de extremidades superiores (AES), constituyen un grave problema de salud pública, ya que estas personas evolucionan con diversos grados de discapacidad, habitualmente en un período de la vida laboralmente activa [3].

A pesar de los esfuerzos en investigación encaminados a la innovación tecnológica sobre la mano humanoide, existen encuestas sobre la funcionalidad de la mano protésica con respecto a su uso en las actividades cotidianas en donde los amputados reportan inconformidad en relación a los aspectos estéticos (62 %), el exceso de peso (58 %) y la falta de capacidades funcionales (50 %). En relación a los movimientos que deberían realizar los dispositivos protésicos, un estudio indicó que el 100 % de los encuestados señaló que la prótesis debería ser capaz de extender el dedo índice, 90 % se inclinó hacia la capacidad de controlar los dedos y el 70 % dijo que sería útil tener muñeca con la habilidad de realizar los movimientos de flexión y extensión. Estos movimientos podrían mejorar los aspectos físicos y psicológicos de las personas amputadas [4, 5].

Actualmente en el Ecuador, según datos del Consejo Nacional de Discapacidades (CONADIS) hasta abril de 2015, se contabilizaron un total 203.880 personas con algún tipo de discapacidad física, que representan el 48,98 % del total de discapacidades en el país. En la zona 6 (provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago) con corte a la misma fecha, se tiene un total de 19.620 personas que registran discapacidad física. Dentro del grupo considerado, se estima que se encuentren niños/as y adolescentes presentando amputación de algún miembro, bien sea de extremidad superior o inferior [6]. Para los pacientes con amputación

de miembro inferior se hace necesario desarrollar dispositivos que le faciliten sus actividades cotidianas, dado que los costos de adquisición de prótesis funcionales en el mercado se encuentran alrededor de los \$16.000.

Dado lo anterior, el grupo de investigación de ingeniería eléctrica, de la Universidad Católica de Cuenca (UCACUE), con el apoyo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación a través del Programa Prometeo, propone diseñar y construir una prótesis biomecánica de mano derecha para los niños/as mayores de 8 años y adolescentes con capacidades especiales residentes en la zona 6 del Ecuador con la intención de mejorar la calidad de la vida de los pacientes amputados, que al llegar a usar un modelo de mano sustituta puedan llevar a cabo funciones de la vida diaria que le permitan superar la limitación circunstancial de no contar con una de sus manos.

2. Metodología

2.1. Fase 1: Evaluación preliminar

En esta etapa se realiza una revisión detallada acerca de los parámetros anatómicos, fisiológicos y biomecánicos asociados a la mano de un niño mayor de 8 años. Adicionalmente, se lleva a cabo la medición de las dimensiones antropométricas de la mano de un infante con la edad indicada. Así mismo, se definen las características esperadas para la prótesis y las restricciones de diseño particulares al caso.

2.2. Fase 2: Diseño de la prótesis

Una vez definidas las especificaciones de diseño, se procede a generar tres alternativas de solución diferentes tanto en su forma como en los elementos que requiere para su funcionamiento. Con esta información, se procede a evaluar las ventajas y desventajas de cada alternativa con el propósito de seleccionar la mejor opción, la cual es modelada empleando un programa de diseño asistido por computador que permite la realización de un estudio de movimiento de los componentes de la mano, así como la ejecución de un análisis de esfuerzos, desplazamientos

y condición de falla para los escenarios de operación. Adicionalmente, se seleccionan los materiales de cada componente estructural de la prótesis y los elementos mecánicos y electrónicos que permitirán su apropiado funcionamiento.

2.3. Fase 3: Construcción

Para llevar a cabo la construcción se realiza un estudio previo de disponibilidad de materiales y tecnologías de manufactura para este tipo de dispositivos en el país. Posteriormente, se procede a fabricar los elementos estructurales y a adquirir los componentes necesarios para el ensamblaje. Por otra parte, en base a los movimientos asignados a la prótesis se lleva a cabo la programación del sistema de control que dirigirá los movimientos asignados.

2.4. Fase 4: Pruebas de funcionalidad

Una vez garantizada la confiabilidad de la prótesis en la realización de las fases previas, se llevan a cabo las pruebas requeridas para el dispositivo con el objetivo de verificar que el diseño cumple con las especificaciones de funcionamiento necesarias.

3. Resultados

3.1. Consideraciones de diseño

A continuación se indican los parámetros considerados al momento de realizar el diseño de la prótesis de mano, tomando en cuenta las características esperadas de la solución y las restricciones establecidas para la misma, a ser utilizadas en la selección de la solución más adecuada.

- **Movilidad:** el modelo seleccionado debe realizar el mayor número de movimientos posibles asociados con la mano humana.
- **Costo:** el sistema a diseñar no debe superar el precio de venta de una prótesis comercial con características similares.
- **Peso:** el peso de la estructura del dispositivo electrónicos debe ser lo más aproximado posible al de una mano humana, de acuerdo a las características del paciente.

- **Proceso de fabricación:** la manufactura de los elementos estructurales de la prótesis debería adaptarse a la tecnología disponible en el Ecuador.
- **Sistema de control:** debe permitir controlar la fuerza y movimientos ejercidos por los dedos.
- **Mantenimiento:** la prótesis debe diseñarse con criterio de mínimo mantenimiento de cada uno de sus componentes.

3.2. Alternativas de solución

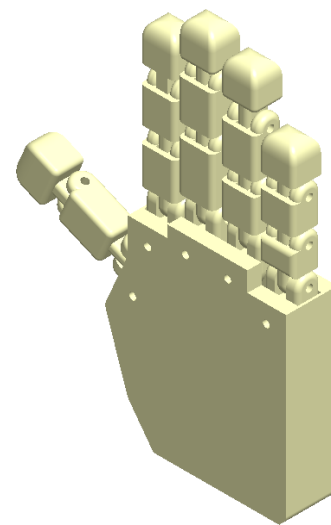


Figura 1: Alternativa 1

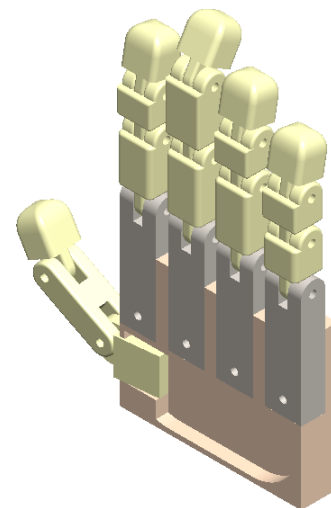


Figura 2: Alternativa 2

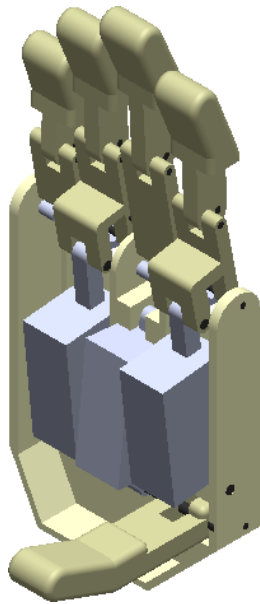


Figura 3: Alternativa 3

El proceso de búsqueda de soluciones se llevó a cabo en base a las consideraciones de diseño planteadas. Para ello, se generaron tres alternativas, geoméricamente diferentes, basadas en una mano antropomórfica, ver Figuras 1, 2 y 3.

Al evaluar las alternativas planteadas en relación a las consideraciones de diseño, se selecciona la opción 3 (Figura 3), de la cual se indica una descripción detallada en el apartado 3.3.

3.3. Solución propuesta

La prótesis biomecánica para niños consta de cinco dedos, de los cuales cuatro están dispuestos uno al lado del otro, mientras que el pulgar está localizado en oposición a éstos (ver Figura 4). El dedo índice y el anular tienen una estructura mecánica similar así como el dedo medio y meñique. La Figura 5 muestra la estructura del dedo meñique, el cual tiene cinco articulaciones, dos que se unen a la palma de la mano, dos que conectan a la falange media distal y una articulación común para el movimiento de los dedos. La Figura 6 muestra la estructura del dedo anular.

Para que la prótesis realice los movimientos deseados se emplea un sistema motriz basado en tres actuadores lineales, Firgelli–modelo PQ–12;100:1;12v, colocados en la palma de mano;

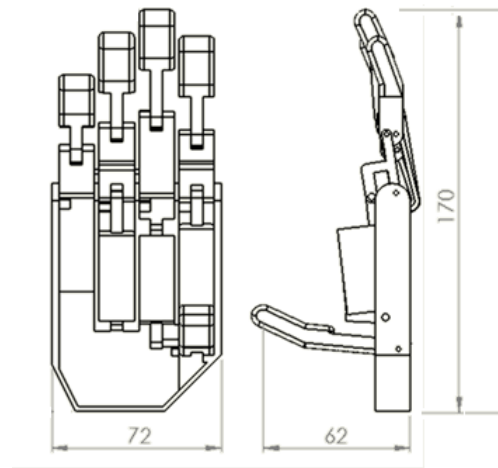


Figura 4: Estructura mecánica de la prótesis y dimensiones generales (a) Vista interior (b) Vista derecha (medidas en mm)

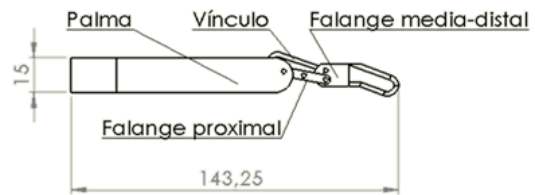


Figura 5: Estructura del dedo meñique

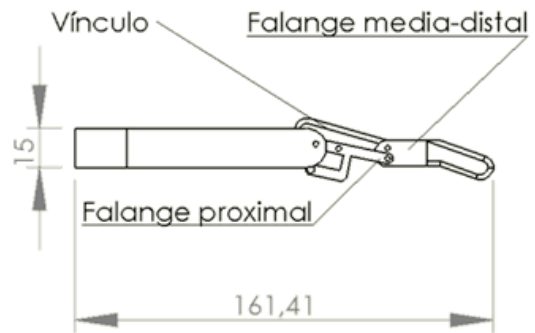


Figura 6: Estructura del dedo anular

el primero ubicado en la canal del dedo índice, el segundo situado en la canal del dedo medio conectado al dedo pulgar y el tercero articulado al eje de la falange distal del dedo anular para permitir la movilidad de los dedos medio, anular y meñique. La Figura 7 ilustra la localización de los tres actuadores lineales en la palma de la mano.

Los ángulos de movimientos de los dedos (flexión y extensión) son controlados por un

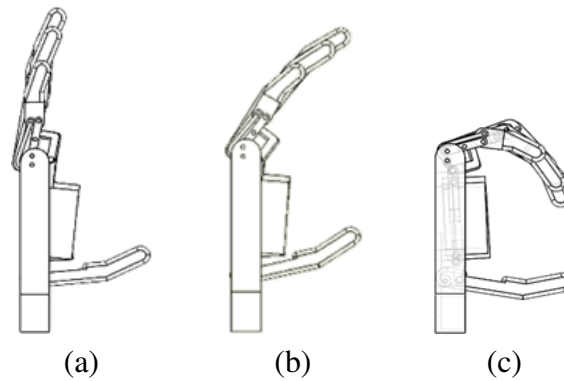


Figura 9: Comportamiento del vínculo durante los movimientos, (a) Extensión, (b) Intermedio, (c) Flexión

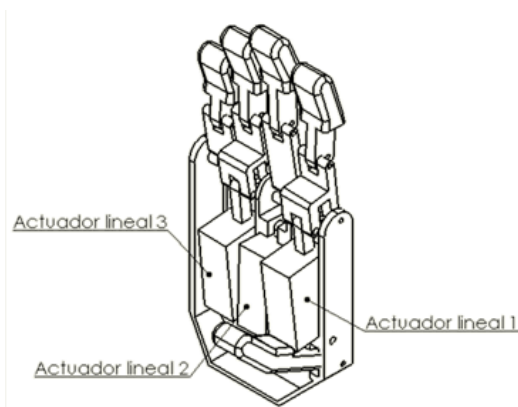


Figura 7: Distribución de los actuadores lineales en la palma de la mano

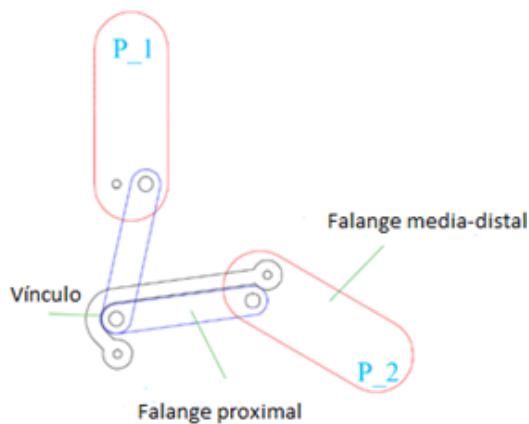


Figura 8: Configuración del vínculo sobre el dedo meñique

vínculo localizado lateralmente a los dedos ejerciendo un límite mecánico para la extensión (P-1) hasta llegar a la flexion completa (P-2), como se muestra en la Figura 8. La Figura 9

indica la vista lateral de las posiciones de la mano limitada por el vínculo.

Para validar el diseño, se llevó a cabo un análisis de esfuerzos, desplazamientos y del factor de seguridad que ofrece el dispositivo con los materiales seleccionados y las cargas de operación, empleando un programa basado en el tecnicas numéricas de aproximación y el Método de Elementos Finitos.

Como condición de borde se supone restricción de movimiento en la palma de la mano y la condición de deslizamiento en el extremo de cada dedo (falange distal). Se estiman dos posiciones para el estudio, la primera, presión cilíndrica, suponiendo el agarre de un objeto de 40 mm de diámetro; la segunda posición, oposición del pulgar o pinza, simulando la sujeción de un objeto muy delgado. Las cargas sobre la prótesis son localizadas en los actuadores lineales asociados a los dedos involucrados, se estima para el estudio en base a criterios de condición crítica de diseño un incremento del 25 % de la carga máxima que genera el actuador lineal.

Tabla 1: Comparación del peso utilizando materiales metálicos

Material	Peso (gramos)
Aluminio	213
Titanio	326

Adicionalmente se seleccionó un material para cada componente de la prótesis, estableciendo un polímero ABS con un módulo elástico de 200 MPa para la palma, falanges y los vínculos, mientras que para los pasadores se escogió una aleación de acero de límite elástico 620,42 MPa [7], todo esto proporciona un peso de 73,11 gramos. Si se considera el peso de los tres actuadores lineales (15 gramos cada uno), y el resto de los componentes, el peso total del modelo es de 150 gramos, lo cual favorece los criterios de diseño establecidos, además cumple con los parámetros fijados en Belter, *et al* [8] según los cuales el peso de la prótesis debería representar el 0,6 % del peso total del cuerpo en hombres, mientras que para la mujer representaría el 0,5 % del peso. Por otra parte, es conveniente comparar el peso que podría alcanzar la prótesis si se construyera con materiales metálicos, por lo cual se realizó una estimación del peso total asignando el aluminio y el titanio como materiales de la estructura, como se indica en la Tabla 1.

En el análisis de esfuerzo llevado a cabo basado en la aplicación de las cargas críticas de operación se obtuvo un máximo esfuerzo para la condición de presión cilíndrica de 194 MPa (ver Figura 10), localizado en el pasador que articula el dedo pulgar con el actuador lineal, mientras que para la posición de oposición del pulgar con el índice se obtuvo un esfuerzo de 182,4 MPa en el mismo elemento (ver Figura 11); sin embargo, para ambas condiciones el dispositivo protésico operaría sin problema de acuerdo al resultado analítico del factor de seguridad para la condición más crítica es de 3,20. Por otra parte, el máximo desplazamiento que ocurre en el modelo es menor a 1 mm, lo cual no se considera significativo (ver Figura 12). Con esta verificación se procedió a la fabricación del modelo prototipo para hacer las pruebas usando técnicas de impresión 3D con el material previamente establecido.

Para controlar los movimientos de la prótesis se utilizó un sistema de control proporcionado. El sistema contiene tres actuadores lineales, que proporciona su posición según lo indique

el microcontrolador Arduino Nano V, vía señal de entrada analógica, como se muestra en la Figura 13.

La posición de los actuadores lineales son admitidas a los puertos análogos del microcontrolador Arduino. Esta señal referencia el control que es llevado a cabo sobre los actuadores lineales en la posición de los dedos pulgar, índice y anular, efectuando cuatro movimientos principales:

Mano abierta: todos los actuadores están completamente estirados considerando los límites impuestos por los vínculos de cada dedo, ver Figura 14-a.

Mano cerrada: todos los actuadores están retraídos, nuevamente tomando en cuenta el límite para la flexión establecido por el vínculo en el diseño de la prótesis, ver Figura 14-b.

Dedo índice extendido: el dedo índice está estirado por tanto los actuadores lineales de los dedos pulgar y anular se encuentran retraídos ver Figura 14-c.

Oposición del pulgar (pinza fina): los actuadores de los dedos índice y pulgar están retraídos mientras que el actuador del dedo anular está estirado, ver Figura 14-d.

Los movimientos son generados cuando ellos tienen un estímulo, en este caso fueron usados pulsos para chequear la operación.

4. Conclusiones

Se presentan los avances del diseño y construcción de una prótesis biomecánica de mano derecha, cuyas características geométricas están basadas en medidas antropométricas de un niño de 8 años de edad de estatura promedio.

La estructura del prototipo se fabricó utilizando la técnica de impresión 3D con un polímero ABS de alta resistencia.

El diseño de la prótesis admite la realización de los movimientos de pinza con los dedos índice y pulgar (sostener objetos delgados con los dedos índice y pulgar), la extensión del dedo índice que permite al paciente llevar a cabo acciones sobre pantallas táctiles y lógicamente ofrece la posibilidad de presión cilíndrica como

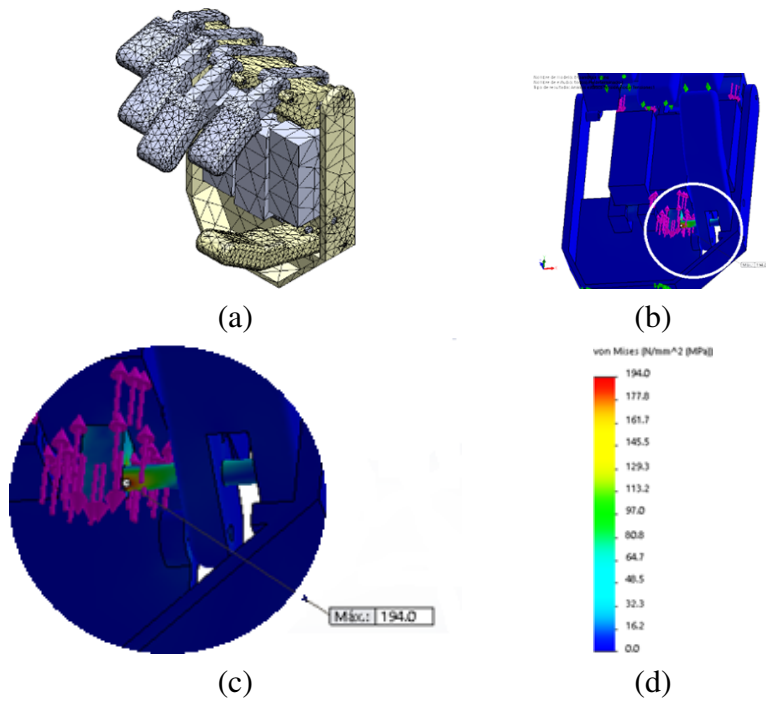


Figura 10: Distribución de esfuerzos (MPa) para la posición de presión cilíndrica, (a) Malla con elementos finitos, (b) Localización del máximo esfuerzo, (c) Detalle del máximo esfuerzo, (d) Escala de esfuerzos (MPa)

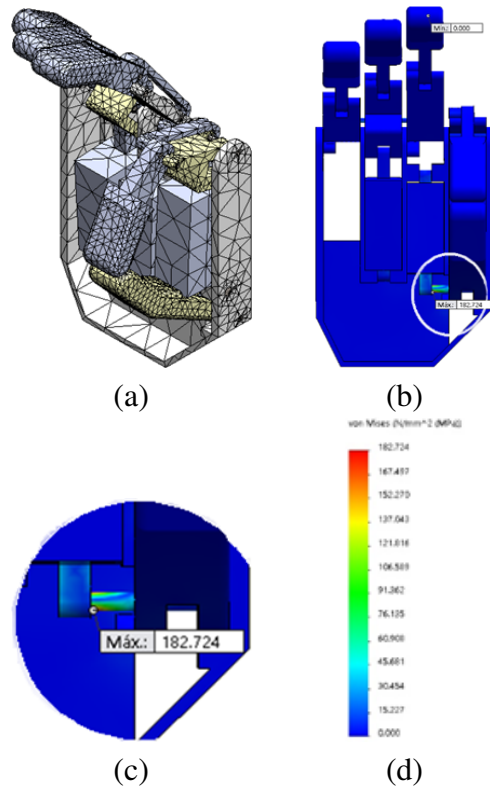


Figura 11: Distribución de esfuerzos (MPa) para la posición de pinza-oposición de pulgar e índice, (a) Malla con elementos finitos, (b) Localización del máximo esfuerzo, (c) Detalle del máximo esfuerzo, (d) Escala de esfuerzos (MPa)

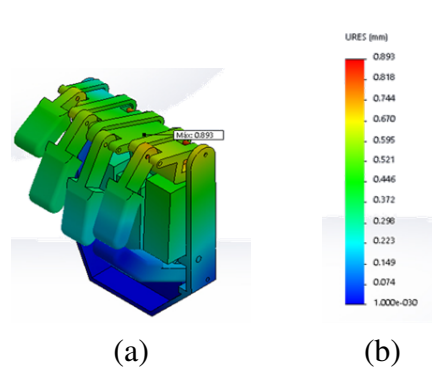


Figura 12: Distribución de desplazamientos (mm) para la posición de presión cilíndrica, (a) Localización del máximo desplazamiento, (b) Escala de desplazamientos (mm)

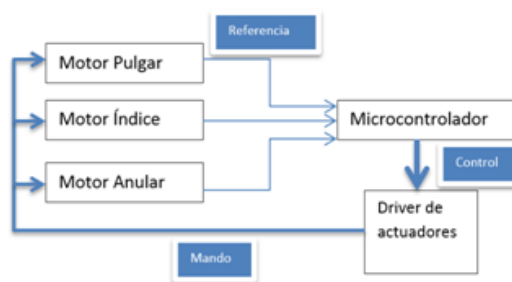


Figura 13: Diagrama del sistema de control

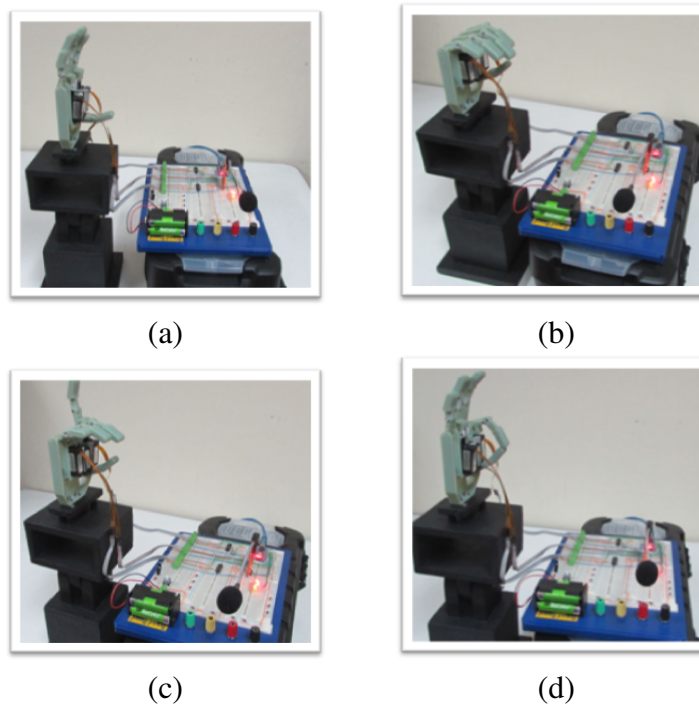


Figura 14: Posiciones para los dedos (a) Mano abierta, (b) Mano cerrada, (c) Dedo índice extendido, (d) Pinza fina

función principal de la mano, utilizando sólo tres actuadores lineales.

El peso y dimensiones de la estructura de la mano se logran optimizar utilizando una herramienta computacional basada en el Método de Elementos Finitos, obteniéndose un comportamiento satisfactorio de la prótesis ante las solicitaciones exigidas por las cargas aplicadas en el estudio. Los elementos más vulnerables a la falla en la prótesis son los pasadores que articulan el dedo pulgar con un vástago del actuador lineal 2.

El sistema de control se planteó con la premisa de hacerlo lo más simple posible, esto con el fin de reducir costos, brindarle mayor fiabilidad, reducido mantenimiento, fácil reparación, tamaño compacto y portabilidad. De esta forma el sistema final usa para el ingreso de órdenes un módulo de reconocimiento de voz (Voice Recognition Module V2), en base a la experimentación su eficacia es superior al 95 % si los comandos son emitidos por la misma persona con la que se entrenó y de un 60 % con otras personas.

El control puro se realiza con un módulo Arduino Nano V el cual usa un microcontrolador ATmega 328, el sistema es a lazo cerrado empleando el sensor de posición propio de los motores Firgelli PQ12. La principal característica para la selección del Arduino Nano es su reducido tamaño.

La etapa de potencia emplea únicamente el driver L293D con dos chips, su fiabilidad se probó durante 6 meses de funcionamiento con los distintos prototipos sin falla alguna o calentamiento excesivo.

Para alimentación de todo el sistema incluido los 3 motores, usaron 4 baterías AA NiMH recargables a 2050 mAh y 1.2 v, lo cual permite portabilidad del sistema.

En relación al costo, se estima que al culminar el dispositivo se haya invertido un monto inferior a \$ 950 lo cual resultaría un valor muy inferior a los dispositivos comerciales.

5. Acknowledgement

The authors, particularly Brizeida Gámez, thank to “Proyecto Prometeo SENESCYT” for partial support of this research.

Referencias

- [1] Adalbert Ibrahim Kapandji. *Fisiología articular. Tomo 1. Hombro, codo, pronosupinación, muñeca, mano*. Médica Panamericana, 2006.
- [2] Deirdre M Desmond, Laura Coffey, Pamela Gallagher, Malcolm MacLachlan, Stephen T Wegener, and Fiadh-nait O’Keeffe. *Oxford Handbook of Rehabilitation Psychology*, chapter Limb Amputation, pages 351–367. Oxford University Press, 2012.
- [3] J. Contreras-Bizama, S. Maher-Lavandero, D. Nuñez Leiva, M. Coronado-Cofre, and R. Gayoso Neira. Amputación de extremidades superiores: caracterización epidemiológica. *Revista Chilena de Salud Pública*, 14(2/3):417–463, 2010.
- [4] JL Pons, E Rocon, R Ceres, Dominiek Reynaerts, B Saro, S Levin, and W Van Moorleghe. The manus-hand dextrous robotics upper limb prosthesis: mechanical and manipulation aspects. *Autonomous Robots*, 16(2):143–163, March 2004.
- [5] Christian Pylatiuk, Stefan Schulz, and Leonhard Döderlein. Results of an internet survey of myoelectric prosthetic hand users. *Prosthetics and orthotics international*, 31(4):362–370, 2007.
- [6] Consejo Nacional de Discapacidades del Ecuador (CONADIS). *Normativas en discapacidad*, 2015. url: <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/>.
- [7] MatWeb, Material Property Data. *Materials Information*, 2015. url: <http://www.matweb.com/>.
- [8] J. Belter, J.L. Segil, and A.M. Dollar. Mechanical design and performance specifications of antropomorphic prosthetic hand: A review. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 5(5):599–618, 2013.

Operating parameters more appropriate in the process of roasted cocoa almonds

R. Calderón^a, Y. Chaurán^a, N. Mendoza^b, C. Vega^c, J. Rojas^d, L. Manganiello^{*b}

^aEscuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bCentro de Investigaciones Químicas (CIQ), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^cInstituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado (IMYCA), Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^dEscuela de Chocolatería de la Alianza de Países Bolivarianos de América (ALBA), Maracay, Venezuela

Abstract.-

Compounds in cocoa are high nutritional value such as polyphenols, to which they are associated high health benefits, highlighting the high antioxidant activity which prevents cellular aging as well as the emergence of certain diseases associated with free radical action such as cancer. During the roasting process for obtaining chocolate and its derivatives percentage decreases substantially. In this paper we study the most appropriate temperature and time in the roasting process carried out at the School of Chocolatería of Alba. Also a multi factorial experimental design roasting process to detect the effect of these parameters on the recovery percentage of total polyphenols is performed. These samples are evaluated by spectrophotometry UV-visible predilution by a factor of 50 and using tannic acid as patterns representative of the fraction of total polyphenols present in cocoa almonds, 0.001 to 0.004 % concentrations of compound. The results show that with a processing temperature (110.0 ± 0.5)°C and time (90.0 ± 0.5) min the best recovery of total polyphenols is achieved. The current energy cost was calculated per year, obtaining the proposed condition in this research is more feasible energy that the conditions under which currently operates the toaster oven Chocolatería School with a percentage of energy savings (24.0 ± 0.1) %.

Keywords: Theobroma cacao L; total polyphenols; tannic acid; roasting process; UV-visible

Parámetros de operación más adecuados para el proceso de tostado de almendras de cacao

Resumen.-

En el cacao se encuentran compuestos de alto valor nutricional como son los polifenoles, a los cuales se les asocian altos beneficios para la salud, destacándose la alta actividad antioxidante, la cual previene el envejecimiento celular así como también la aparición de determinadas enfermedades asociadas a la acción de radicales libres como es el cáncer. Durante el proceso de tostado para la obtención del chocolate y sus derivados su porcentaje puede disminuir considerablemente. En el presente trabajo se estudio la temperatura y el tiempo más adecuado en el proceso de tostado llevado a cabo en la Escuela de Chocolatería de la Alba. Además se realizó un diseño experimental factorial multinivel del proceso de tostado a fin de detectar el efecto de estos parámetros sobre la recuperación del porcentaje de polifenoles totales. Estos se cuantificaron en las muestras mediante la técnica de espectrofotometría UV- visible, previa dilución en un factor de 50 y utilizando patrones de ácido Tánico como compuesto representativo de la fracción de polifenoles totales presentes en la almendra de cacao, a concentraciones de 0,001 - 0,004 %. Los resultados obtenidos muestran que con una temperatura de procesamiento de ($110,0\pm 0,5$)°C y tiempo de ($90,0\pm 0,5$) min se alcanza la mejor recuperación de polifenoles totales. Se calculó el costo energético actual por año, obteniendo que la condición propuesta en esta investigación es más factible energéticamente que las condiciones en las cuales opera actualmente el horno tostador de la Escuela de Chocolatería con un porcentaje de ahorro energético de ($24,0 \pm 0,1$).

Palabras clave: theobroma cacao L; polifenoles totales; ácido tánico; proceso de tostado; UV-visible

Recibido: diciembre 2015

Aceptado: marzo 2016

1. Introducción

Theobroma cacao L escrito en latín que significa “alimento de los dioses”, es el nombre científico que recibe el árbol del cacao o cacaotero. El cacao es un cultivo íntimamente ligado a la cultura venezolana, tanto por su origen como por su gran importancia en el desarrollo económico y social del país, desde que se estableció su comercialización [1]. Durante siglos, los expertos han coincidido en una realidad básica: “el cacao venezolano es el más sabroso y aromático del mundo”. El concepto de que el chocolate es solo una golosina está sobrevaluado. El valor nutricional del grano de cacao es tan reconocido que incluso Alexander Von Humbolt declaró “En ningún otro tiempo la naturaleza ha concentrado tanta abundancia de nutrientes valiosos en un espacio tan pequeño como en el haba de cacao”. Ente los beneficios que se atribuyen al consumo del cacao esta, la alta actividad antioxidante, esto ha motivado en los últimos años un aumento del interés en las determinaciones de polifenoles y sus derivados, ya que son una fuente importante de nutrientes que ejercen un efecto positivo en la salud. Situaciones como el estrés, la mala alimentación y la contaminación contribuyen a la aparición de radicales libres que son los responsables tanto del envejecimiento celular como de la aparición de determinadas enfermedades. Para combatirlos, nuestro organismo necesita de sustancias antioxidantes, cuya misión es neutralizarlos, por lo que requerimos sustancias que nos ayuden a contrarrestarlos como lo son los polifenoles [2]. El cacao constituye una fuente muy importante de dichos compuestos, este puede contener entre 10 hasta 50 mg de polifenoles totales/g. Al ingerir estos compuestos, nuestro organismo los procesa y estos aumentan la capacidad de combatir los radiales libres. Además,

estas sustancias tienen la capacidad de absorber los metales pesados que circulan por nuestro organismo y así neutralizarlos, impidiendo que nuestro cuerpo se vea afectado por ellos. Tienen propiedades antiinflamatorias al tiempo que protegen nuestro sistema cardiovascular fortaleciendo los capilares pequeños. Son sustancias que se han demostrado efectivas a la hora de prevenir ciertos tipos de cáncer y también protegen nuestro hígado de las toxinas [2]. Una de las etapas de procesamiento del cacao para la obtención de productos terminados como el chocolate y derivados es el proceso de tostado. En esta etapa se dan las reacciones necesarias para la formación de los compuestos que finalmente determinan el aroma, sabor y color característico del grano, pero también es la etapa en la que disminuye la cantidad de polifenoles presentes en la almendra de cacao, debido a que involucra calentamiento (aumento de temperatura) por un determinado intervalo de tiempo. Dependiendo de la exposición a la que se encuentre la almendra de cacao variara el contenido de polifenoles totales [3]. Para la realización de la investigación se contó con el horno estático del tipo vertical de la Escuela de Chocolatería de la Alba, Maracay – Estado Aragua, donde se estudió el proceso de tostado y mediante el uso de la técnica de espectroscopia de UV-visible se realizaron las determinaciones del porcentaje de polifenoles totales. Es por ello, que en la presente investigación se busca obtener el tiempo de tostado y la temperatura de procesamiento más adecuada para evitar la mayor cantidad de pérdidas de estas sustancias que son tan beneficiosas para la salud humana.

2. Experimental

2.1. Reactivos y equipos

Reactivos

Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico de alta pureza. Se utilizó agua ultrapura, MilliQSystem (MilliporeCo.). Acetona (Riedel-De Haën), Metanol (Sigma-Aldrich), Ácido clorhídrico al 31 % (Merck) y Ácido Tánico (Merck).

*Autor para correspondencia

Correo-e: lmanganiello@uc.edu.ve (L. Manganiello)

Equipos e instrumentos

Horno tostador vertical estático (diseño del Instituto de Ingeniería – Caracas, Venezuela); pH-metro digital modelo HI98108 pHep+ (Hanna Instruments); Balanza analítica de alta precisión tipo APX (DENVER); Planchas de agitación (Thermolyne, CIMAREC); Sistema de Ultrafiltración al Vacío (Kontes Ultra Ware); Centrifugadora (Thermoscientific ICE CL10); Espectrofotómetro UV- Visible con arreglo de diodos, Modelo 8452A (Hewlett Packard); Micropipetas de volumen variable (Eppendorf Research Serie 2100).

2.2. Muestra

Materia prima cacao criollo (almendras), provenientes de la comunidad de Cumboto productores de cacao Cumbe, genotipos del tipo 60 y 61. Previamente sometida a los procesos de fermentación y secado en el Central de Beneficio de Ocumare de La Costa Aragua, Venezuela.

2.3. Preparación de las muestras para la cuantificación de polifenoles totales

Las muestras de cacao se cortaron (filetearon) a un tamaño uniforme de medio milímetro, se pesaron ($0,5000 \pm 0,0001$) g en un vaso de precipitado por duplicado en una balanza analítica, para luego ser homogenizadas a temperatura ambiente con ($5,0 \pm 0,5$) mL de una mezcla de metanol-agua (50/50) acidificada con ácido clorhídrico al 31 %.

Se agitó la mezcla durante 2 horas, luego las muestras se agregaron en tubos de ensayo para ser centrifugadas a 1450 revoluciones por 2 min, y posteriormente se filtraron al vacío. Los sobrenadantes se añadieron en balones de 50 mL y sobre los residuos se añadieron ($5,0 \pm 0,5$) mL de una mezcla de acetona-agua 70:30 en un vaso de precipitado, donde por una hora constante se agitó y se procedió con la centrifugación y filtración de la misma manera, obteniéndose un segundo sobrenadante que se combinó con el anterior en los balones aforados de 50mL, se llevaron hasta el aforo con una mezcla 50:50 de las dos soluciones extractivas (metanol-agua) y (acetona- agua), posteriormente se colocaron en frascos color ámbar de 60 mL de capacidad y se refrigeraron a una temperatura de 4 °C. Una vez

obtenidas las soluciones extractivas se procedió a la cuantificación de los polifenoles totales, para ello se utilizó el método espectroscópico UV-visible, donde se prepararon primeramente las soluciones patrones de ácido tánico.

2.4. Determinación de polifenoles totales utilizando el ácido tánico como representación de la fracción total

Para la preparación de la solución madre se pesaron ($2,5000 \pm 0,0001$) g de ácido tánico en un vaso de precipitado, la muestra se diluyó en metanol hasta no observar partículas del ácido y se llevó a un balón aforado de 500 mL de capacidad donde se agregó igualmente metanol hasta el aforo. A partir de la solución madre se preparó una solución intermedia de una concentración de ($0,03 \pm 0,01$) % de ácido tánico. Y a partir de esta se prepararon las soluciones patrón en un rango comprendido de 0,001- 0,004 % de ácido tánico

2.5. Estudios para mejorar el porcentaje de extracción de polifenoles totales provenientes de almendras tostadas de cacao

Se estableció un barrido de pH en un rango ácido con variaciones de 2 unidades, tomando como referencia a Padilla y colaboradores [4], quien realizó estudios para extraer polifenoles totales con la mezcla metanol-agua en proporción (50:50). Además se contó con una solución metanol-agua (50:50) a pH de 6,5 suministrada por Colina, Rivero y Manganiello [6] la cual se acidificó a pH 5,7 de tal manera de aprovechar la solución y obtener mayores rendimientos al obtenido en su trabajo. Se acidificaron las mezclas metanol-agua con ácido clorhídrico al 31 % hasta lograr ajustar las soluciones extractivas a los pH de 1,0; 3,1; 5,0; 5,7.

2.6. Determinación del porcentaje de polifenoles totales de almendras de cacao antes y después del proceso de tostado

Para el tostado de las almendras bajo el proceso actual de la Escuela de Chocolatería se procedió a realizar un proceso de selección de las almendras de cacao. Se tomó aproximadamente 1 kg de granos de cacao y se introdujo en la

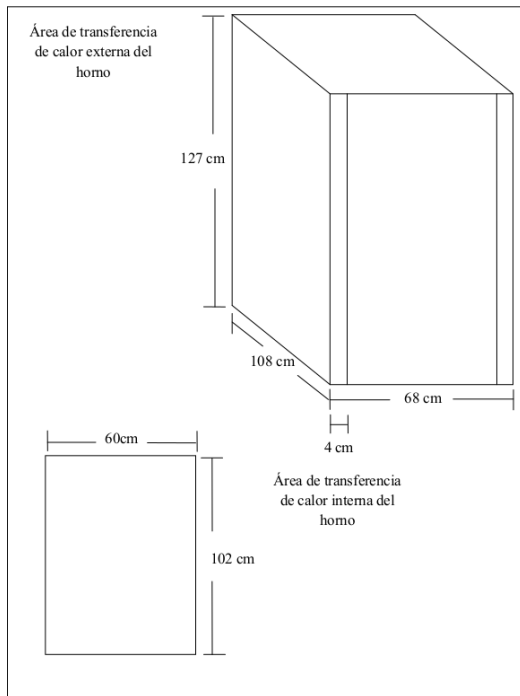


Figura 1: Horno Tostador vertical

bandeja media. Con un cronometro se tomó el tiempo de $(120 \pm 0,5)$ min. Se programó en el tablero del horno la temperatura a $(110 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ y se precalentó el horno durante 10 minutos la Figura 1 muestra el detalle del horno tostador vertical empleado para el presente trabajo. Se determinaron los polifenoles totales utilizando el método de extracción a temperatura ambiente con dos mezclas de solventes a la acidez determinada y el método espectroscópico para la cuantificación de los polifenoles totales, en almendras de cacao sin tostar y sometidas al proceso de tostado actual establecido por la Escuela de Chocolatería.

2.7. Diseño experimental empleado

Se propuso un diseño de experimento factorial multinivel clásico para la optimización de los parámetros de extracción comparando tres variables: temperatura, tiempo de tostado y tres posiciones de bandeja (arriba, medio, abajo), obteniendo un diseño factorial multinivel aleatorio de 36 corridas. Para el establecimiento del diseño experimental se utilizó el programa estadístico GRETL (GNU Regretion time Series Library en cálculo para corte transversal). Se

procedió a realizar un proceso de selección de las almendras para su posterior distribución en las 3 posiciones de bandejas seleccionadas para el tostado. Se tomó aproximadamente 1 kg de granos de cacao y se introdujeron en las tres posiciones arriba, medio y abajo. El tiempo y la temperatura de tostado se programaron tomando en cuenta las combinaciones indicadas en el diseño experimental.

2.8. Cálculo del consumo energético

Mediante las especificaciones obtenidas por el proveedor del equipo [5], se determinó el consumo de energía eléctrica en las condiciones actuales empleadas por la Escuela de Chocolatería las cuales son temperatura de 110°C y tiempo de 120 min, al igual que con las condiciones optimas luego del establecimiento y cumplimiento del diseño experimental. Con la potencia eléctrica asociada al equipo y los tiempos empleados en ambos estudios se calculó el gasto energético en kW/h, luego con los días hábiles laborados al mes se calculó la potencia producida al año y posteriormente mediante un factor de conversión en bolívares se obtuvo el costo en bolívares de energía consumida al mes y su equivalente a un año de producción. Se comparó y analizó bajo el contexto de ahorro energético si las condiciones obtenidas en esta investigación son mejores a las condiciones actuales aplicadas por la Escuela de Chocolatería.

3. Resultados y discusión

3.1. Modificación del método para la obtención del extracto rico en polifenoles totales

Para la extracción de polifenoles totales provenientes de almendras de cacao tostadas se utilizó el método Colina y colaboradores [6], se realizaron diversas modificaciones a este método debido a que los resultados de polifenoles totales obtenidos por estos investigadores arrojaron un valor de $(0,0115 \pm 0,0001)\%$ lo que representa un porcentaje muy bajo para la extracción de polifenoles totales. Para las modificaciones realizadas al método de extracción se tomó parte tanto de la cascara como del cotiledón de las

almendras de cacao. En la primera extracción de polifenoles totales se empleó una solución de metanol-agua en la proporción 50:50 y un tiempo de extracción de 2:00 horas. La literatura reporta tiempos de extracción desde 1 minuto hasta 24 horas [7], teniendo en cuenta que largos periodos de extracción pueden producir oxidaciones en los compuestos de interés [8]. Colina y colaboradores [6] no especifican el tiempo de extracción de polifenoles totales al usar la segunda mezcla de extracción acetona-agua a una proporción 70:30. En los ensayos realizados durante la experiencia se encontró que el tiempo de una (1) hora para esta mezcla de extracción es suficiente ya que si se emplean dos (2) horas se observan modificaciones en el volumen de la mezcla de extracción, debido a que la acetona se evapora. Los solventes empleados en las soluciones extractoras en sus diferentes proporciones se seleccionaron atendiendo a la polaridad de los polifenoles, los cuales se caracterizan por ser polares y solubles en solventes como la acetona y el metanol [4]. Los polifenoles de las almendras de cacao se encuentran tanto en la cascara como en el cotiledón, lo que resultó beneficioso realizar la extracción tomando ambas partes de la almendra, además Cacace y Mazza [9] y Garrido *et al.* [10] establecen que las soluciones extractantes utilizadas solubilizan los compuestos fenólicos con distinta estructura química y potencial antioxidante, en donde la mezcla metanol-agua 50:50 acidificada con ácido clorhídrico extrae aquellas estructuras fenólicas con mayor capacidad antioxidante presentes en el cotiledón de la almendra de cacao, mientras que la mezcla acetona-agua 70:30 extrae a los compuestos presentes en la cáscara.

3.2. Longitud de onda de trabajo y curva de calibración para la cuantificación de los polifenoles totales mediante la técnica de espectrofotometría UV-Visible.

La aplicación de la técnica de espectrofotometría UV-Visible es muy útil para la determinación de los compuestos fenólicos, fundamentado en la alta absorción de los anillos aromáticos presentes en estos compuestos, lo que los hace

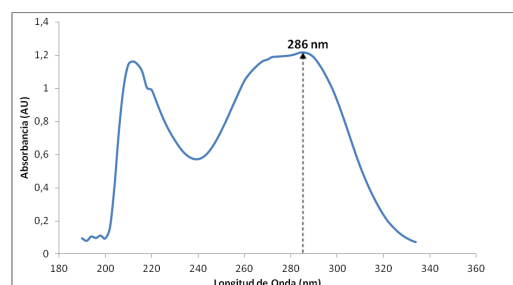


Figura 2: Espectro de absorción característico para un patrón 0,03 % de ácido tánico en metanol, longitudes de onda vs absorbancia

excelentes cromóforos en la región ultravioleta-visible del espectro electromagnético. Las diferentes familias de polifenoles absorben a una longitud de onda característica, la cual depende del número, posición y tipo de constituyente del compuesto que va de un rango de adsorción de 280 a 550 nm [11]. La Figura 2 muestra el espectro de absorción a partir de una solución de ácido tánico a una concentración de 0,03 % en metanol. El pico de mayor absorción se presenta a una longitud de onda de 286 nm, encontrándose en el rango correspondiente a la absorción de los compuestos polifenólicos totales en el cacao, tal y se reporta en la literatura [11], expresados con base al ácido tánico, por lo tanto se seleccionó ese valor como longitud de onda de trabajo. Posteriormente se obtuvo la curva de calibración a partir de los patrones de ácido tánico [12] previamente preparados a concentraciones de 0,001 % a 0,004 %. Para la cuantificación del porcentaje de polifenoles totales en muestras reales se utilizó un factor de dilución de 50 para los extractos de las muestras problema.

La Figura 3 muestra la curva de calibración con patrones preparados a partir de ácido tánico en metanol, observándose una buena correlación entre los valores de patrones y absorbancias obtenidas respectivamente en el rango útil de trabajo. Esto se evidencia por el valor del coeficiente de correlación $R=0,9993$ y del coeficiente de determinación $R^2=0,998$. La ecuación de la recta para la curva de calibración fue la siguiente $Y=553,07x + 0,1868$, donde Y representa los valores de absorbancia leídos en el instrumento y X el

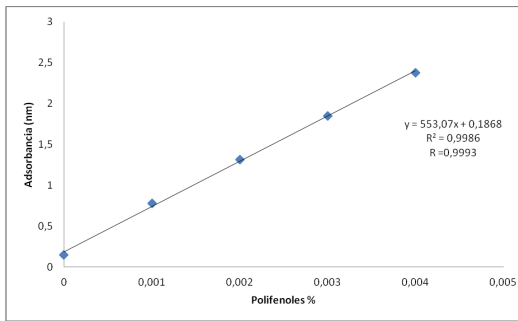


Figura 3: Curva de calibración de polifenoles totales (equivalentes de ácido tánico) en correspondencia con sus absorbancias leídas, empleando como blanco metanol a una λ de trabajo de 286nm

porcentaje de polifenoles totales obtenidos

3.3. Influencia del pH en el porcentaje de extracción de polifenoles totales provenientes de almendras tostadas de cacao

Tabla 1: Influencia del pH en el método de extracción de polifenoles de las almendras de cacao

pH pH \pm 0,1 (adim)	Polifenoles totales % pol \pm 0,01 (adim)
1,0	6,84
3,1	8,17
5,0	7,79
5,7	7,90

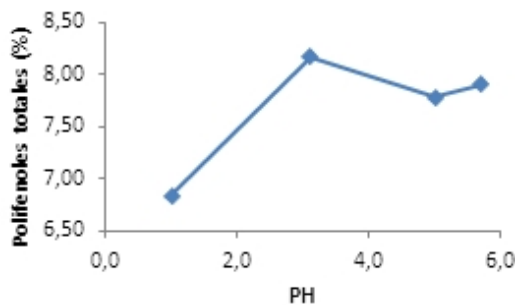


Figura 4: Comportamiento del porcentaje de polifenoles totales respecto a diferentes pH de la mezcla extractiva metanol-agua 50:50

Se estudió el efecto a diferentes valores de pH en el rango ácido tomando en cuenta estudios realizados en estas condiciones [4], dicho estudio

solo menciona la acidificación de la primera mezcla extractiva metanol-agua en proporción (50:50), no el rango adecuado para tal extracción, por tal motivo se selecciono 2 unidades para cada valor de pH establecido. Los resultados obtenidos en el trabajo realizado por Colina y colaboradores [6], muestran que un pH de 6,5 no es adecuado para la extracción, por lo cual no se incluyó el pH de 7 en el estudio ya que arrojaría igualmente bajos rendimientos. Al acidificar la primera solución extractiva Villanueva *et al* [13], establece que está condición proporciona estabilidad sobre las moléculas de los compuestos a extraer. La Tabla 1 muestra el porcentaje de polifenoles totales extraídos de las almendras de cacao a diferentes valores de pH, observándose que a un valor de pH de 3,1 se obtiene el resultado más alto de polifenoles totales extraídos. La Figura 4 muestra claramente que el valor de pH 3,1 es el más adecuado para la extracción de polifenoles totales provenientes de la almendra de cacao. Valores menores al pH 3,1 presentan una disminución drástica en cuanto a la extracción de polifenoles totales y valores mayores al pH seleccionado se observan pérdidas en la recuperación del porcentaje de polifenoles totales.

3.4. Diagnóstico de las condiciones actuales de operación, antes y después del proceso de tostado en el horno tostador vertical

Las condiciones de operación actuales del horno tostador vertical de la escuela de Chocolatería, en función de la temperatura, el tiempo de tostado y la carga de almendras de cacao se realizan en dos modalidades:

Modalidad N° 1

- Temperatura : 110 °C
- Tiempo: 2 horas
- Carga: 20 – 40 kilos de almendras de cacao

Modalidad N° 2

- Temperatura : 90 °C
- Tiempo: 4 horas
- Carga: 60 kilos de almendras de cacao

Para el caso en estudio se seleccionó la modalidad N° 1, motivada a que la cantidad de almendras de cacao era tan solo de 40 kilos, lo cual no aplica a la modalidad N° 2.

Para comprobar que el proceso de tostado ha sido realizado correctamente, el personal técnico experto (maestro - catador) de la Escuela de Chocolatería realiza únicamente pruebas organolépticas que consisten en:

- Desprendimiento de cascarilla: debe desprenderse fácilmente la cáscara del cotiledón cuando se manipula con el tacto.
- Olor y sabor: identificados por el maestro catador

El horno tostador vertical cuenta con tres (3) bandejas para este estudio ubicadas en la parte superior, medio e inferior, observándose un mayor tostado en la bandeja superior disminuyendo su tueste en forma decreciente según la ubicación de las bandejas. En el estudio realizado por Colina y colaboradores [6] en muestras de cacao tostadas en el horno tostador vertical de la Escuela de Chocolatería a 120 °C por 2 horas, antes y después del proceso de tostado en diferentes ubicaciones de bandeja: superior, medio e inferior, se verifica que el resultado del porcentaje de polifenoles totales de las almendras analizadas en cada posición no es uniforme, por lo que se concluye que el horno tiene una distribución irregular del calor (temperatura) para el tueste de las almendras de cacao.

3.5. Determinación del porcentaje de polifenoles totales de almendras de cacao antes y después del proceso de tostado, utilizando condiciones estandarizadas de la Escuela de Chocolatería

Tabla 2: Porcentaje de polifenoles totales (con base al ácido tánico) presentes en las almendras de cacao antes y después de someterlas al proceso de tostado (pt \pm 0,01)

Sin tostar	Tostadas
15,22	8,51

En la Tabla 2 se observa que las almendras de cacao (semillas secas y fermentadas) que no han

sido sometidas al proceso de tostado presentan el mayor contenido de polifenoles totales siendo este igual a 15,22 %, pero una vez tostada, la cantidad de polifenoles totales disminuye en una proporción equivalente a un (44,1 \pm 0,1) %.

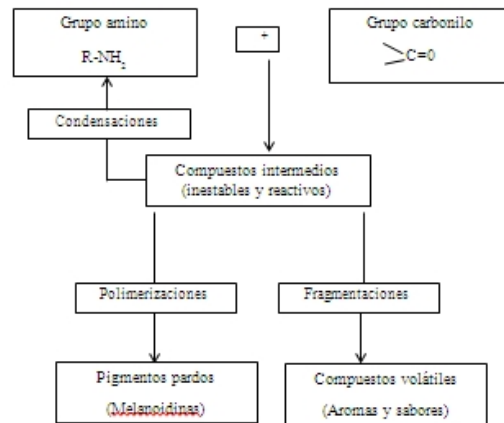


Figura 5: Reacción de Maillard o pardeamiento no enzimático

En el proceso de tostado ocurre un pardeamiento en la almendra que puede desarrollarse por medio de dos mecanismos claramente diferenciados, el pardeamiento enzimático o el pardeamiento no enzimático. Existen estudios [14] que establecen que después de someter la almendra de cacao al tostado se producen compuestos derivados de las reacciones entre azúcares reductores y aminoácidos, conocidas comúnmente como las reacciones de Maillard o pardeamiento no enzimático. La reacción de Maillard se inicia con la condensación entre un grupo carbonilo de un azúcar reductor y un grupo amino de un aminoácido como se muestra en la Figura 5. Mediante una serie de reacciones complejas, que pueden variar en función del pH y de la naturaleza del alimento, se van formando toda una serie de compuestos intermedios, inestables y reactivos, que finalmente mediante reacciones de polimerización entre ellos y con proteínas, dan lugar a los productos (melanoidinas) responsables de la coloración oscura que caracteriza a las almendras y a la formación de compuestos que determinan el aroma y sabor característico del chocolate. Los polifenoles en esta etapa reaccionan con las proteínas lo que contribuye a su descenso [15]. En otros estudios se

evidencia [16] que el tostado es la etapa que tiene mayor influencia sobre el contenido de polifenoles totales de almendras de cacao.

3.6. Diseño de experimento con base en el porcentaje de polifenoles extraídos, variando temperatura y tiempo en el tostado de las almendras de cacao

Un diseño de experimento fue utilizado, debido a que se trabajó con la variación de temperatura y tiempo para tres posiciones de bandejas dentro del horno tostador vertical. El análisis de diseño de experimentos estudia el efecto de dos o más factores en una variable de respuesta continua. El diseño de experimento establecido fue un diseño factorial multinivel con los siguientes atributos:

Clase de diseño: Factorial Multinivel.

Nombre del archivo: Diseño de experimento polifenoles.sfx

Diseño Base

Número de factores experimentales: 3

Número de bloques: 1

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 36

Grados de libertad para el error: 26

Aleatorizar: Sí.

Tabla 3: Atributos del diseño factorial multinivel

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Temperatura (T±0,5)	100,0	120,0	4	°C
Tiempo (t±0,5)	90,0	150,0	3	min
Posición	1	3	3	
Respuestas	Polifenoles totales			%

La Tabla 3 muestra los atributos del diseño, basados en el rango de los parámetros a utilizar considerando los niveles o cantidad de variaciones a ejecutar y la respuesta emitida en porcentaje de polifenoles totales.

El diseño factorial multinivel consiste en 36 ejecuciones (el experimento se realizó por duplicado). El orden de los experimento fue aleatorio, ya que esto aporta protección contra el efecto de variables ocultas. La Tabla 4 contiene la hoja de trabajo con los resultados del porcentaje

de polifenoles totales de todas las extracciones realizadas por promedio, dando un total de 36 corridas para la cual se tomaron en cuenta la posición de bandeja establecida como superior, media e inferior, tiempo y temperatura para el tostado.

El análisis de varianza para polifenoles se observa en Tabla 5 ANOVA. La tabla ANOVA particiona la variabilidad de polifenoles en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. La Razón- F es el valor de la media de cuadrados de cada factor dividido entre la media de cuadrados de los residuos. El valor- P indica el nivel de significancia de cada factor. Valores de P menores de 0,05 indican que los factores son significativos.

En este caso, 1 efecto tiene un valor- P menor que 0,05, indicando que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95,0%. Es decir que la temperatura es el factor principal que afecta significativamente el contenido de polifenoles en la almendra de cacao.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 35,5749% de la variabilidad en polifenoles. El estadístico R-cuadrado ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 13,2739%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,767099. El error medio absoluto (MAE) de 0,527991 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo, un valor bajo del estadístico DW significaría que la relación es espúrea (coincidental), un valor alto del estadístico DW es cuando supera al doble de R-cuadrado. El valor de P que se encuentra a un lado del DW es usado para probar la hipótesis de que el modelo actual es el adecuado. Puesto que P es mayor que 5,0%, no hay indicio de

Tabla 4: Hoja de trabajo del diseño experimental para las variaciones de temperatura, tiempo de tostado y posición de bandejas con el porcentaje de polifenoles totales extraídos

Ejecución	Temperatura ($T \pm 0,5$)°C	Tiempo ($t \pm 0,5$) min	*Posición	Polifenoles pt $\pm 0,01$
1	120,0	90,0	1	6,87
2	100,0	90,0	3	8,29
3	120,0	150,0	1	9,21
4	100,0	150,0	2	6,92
5	100,0	150,0	3	7,30
6	115,0	120,0	3	7,11
7	100,0	90,0	1	8,01
8	120,0	90,0	2	7,37
9	100,0	120,0	2	8,20
10	120,0	120,0	2	7,66
11	115,0	90,0	1	7,67
12	115,0	150,0	3	7,59
13	100,0	90,0	2	7,47
14	110,0	90,0	2	9,70
15	115,0	90,0	2	7,22
16	115,0	150,0	2	6,76
17	100,0	120,0	3	7,33
18	115,0	150,0	1	7,46
19	110,0	150,0	2	9,09
20	110,0	150,0	1	9,53
21	120,0	120,0	3	7,01
22	120,0	150,0	2	8,88
23	115,0	90,0	3	7,49
24	100,0	150,0	1	8,69
25	115,0	120,0	2	7,15
26	110,0	90,0	1	8,63
27	110,0	120,0	2	8,57
28	110,0	120,0	1	8,29
29	110,0	90,0	3	9,15
30	120,0	150,0	3	8,30
31	120,0	120,0	1	7,34
32	100,0	120,0	1	7,32
33	115,0	120,0	1	7,05
34	110,0	120,0	3	8,65
35	110,0	150,0	3	8,43
36	120,0	90,0	3	7,32

*Posiciones: inferior: 1, medio: 2, superior: 3.

autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %, es decir que la selección del modelo es la adecuada.

La Figura 6 presenta el gráfico de efectos principales para polifenoles el cual muestra la influencia que tienen las variables de forma individual sobre la variable respuesta. Se presenta como la respuesta predicha. Varía cuando cada

uno de los factores del modelo cambia del nivel bajo al alto, con todos los demás factores fijados en el centro de la región experimental (un punto medio entre el nivel bajo y alto). Cuando todos los factores se dibujan en el gráfico anterior, es más fácil juzgar cuales factores tienen el más alto impacto. Se aprecia, al igual que los análisis anteriores que la temperatura es la variable que más afecta el contenido polifenólico de la

Tabla 5: Análisis de Varianza para polifenoles

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: temperatura	0,573146	1	0,573146	0,97	0,3328
B: tiempo	0,135473	1	0,135473	0,23	0,6354
C: posición	0,202352	1	0,202352	0,34	0,5627
AA	3,06308	1	3,06308	5,21	0,0309
AB	1,93492	1	1,93492	3,29	0,0813
AC	0,0253309	1	0,0253309	0,04	0,8373
BB	1,38656	1	1,38656	2,36	0,1369
BC	1,17701	1	1,17701	2,00	0,1691
CC	0,000116536	1	0,000116536	0,00	0,9889
Error total	15,2995	26	0,588441		
Total (corr.)	23,7477	35			

R-cuadrado = 35,5749 %
R-cuadrado (ajustada por g.l.) = 13,2739 %
Error estándar del est. = 0,767099
Error absoluto medio = 0,527991
Estadístico Durbin-Watson = 2,25003 (P=0,7459)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,125287

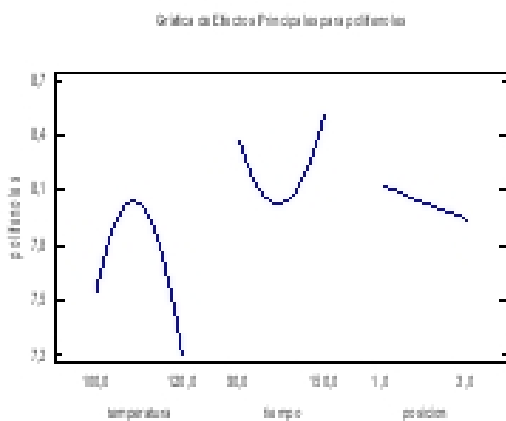


Figura 6: Efectos de variación: temperatura, tiempo y posición de bandeja en la determinación de polifenoles totales en almendras de cacao tostadas.

almendra de cacao, ya que con un incremento mayor a 110°C el porcentaje de polifenoles disminuye. Con respecto al tiempo, su variación no tiene un efecto significativo en los polifenoles, al igual que la posición de las bandejas, ya que en la posición 3 (superior) el contenido polifenólico es menor con respecto a las otras dos posiciones, esto debido a que en la parte superior del horno las almendras de cacao se tostan más, lo que comprueba que el diseño del horno ocasiona un tueste irregular.

3.7. Efecto de la temperatura y tiempo de tostado en el horno tostador vertical en el contenido de polifenoles totales en almendras de cacao

Se construyeron gráficas tridimensionales que permiten visualizar la relación que existe entre las tres variables estudiadas con la finalidad de mostrar el efecto de la variación de cualquiera de estos parámetros en el porcentaje de polifenoles totales obtenido a partir de la almendra de cacao tostada. Un tostado correcto es un proceso dependiente del tiempo y la temperatura, donde el tiempo puede variar de 5 a 120 minutos y la temperatura de 120 a 150°C [17], como se reporta en la bibliografía, la temperatura de tostado del cacao influye de forma significativa en el sabor y aroma final del producto, por ello es importante establecer la temperatura en que debe ser tostado el grano [18].

El efecto de la temperatura se estudió en un intervalo comprendido entre 100°C a 120°C, manteniendo constante el tiempo de tostado en 90 min, 120 min y 150 min respectivamente. Bajo estas condiciones de operación se determinaron los porcentajes de polifenoles totales en cada posición de bandeja (superior, medio e inferior) por duplicado. La Figura 7 muestra el comportamiento del porcentaje de polifenoles totales obtenidos a partir de los diferentes valores de temperatura

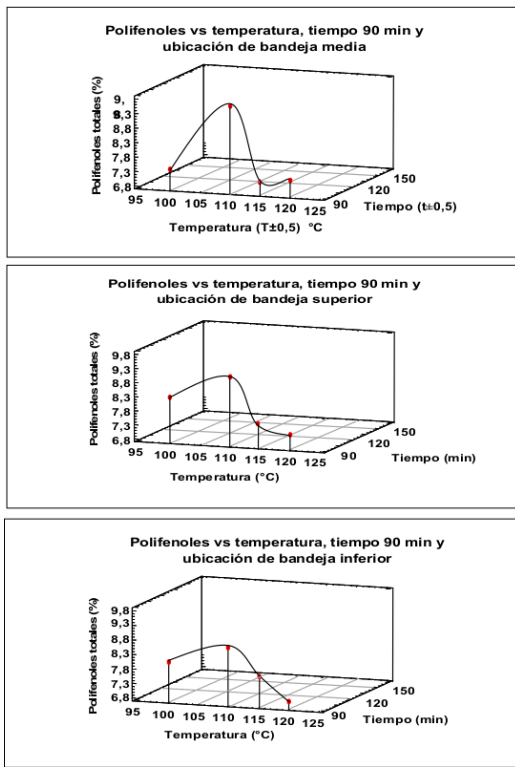


Figura 7: Efecto de la temperatura y posición de bandeja a tiempo 90 min constante de tostado en el porcentaje de polifenoles totales

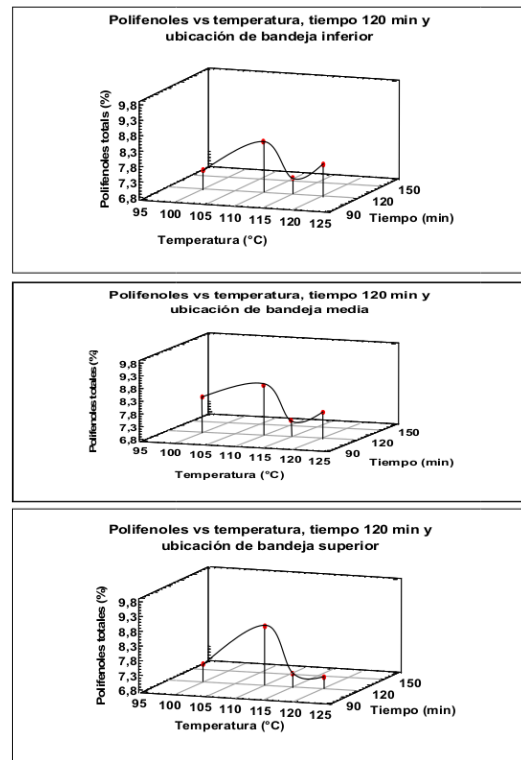


Figura 8: Efecto de la temperatura y posición de bandeja a tiempo 120 min constante de tostado en el porcentaje de polifenoles totales

estudiados, arrojando que a la temperatura de 110 °C y la posición medio de bandeja reporta el mayor valor de porcentaje de polifenoles totales. La Figura 8 muestra que a la temperatura 110°C y posición de bandeja superior, el porcentaje de polifenoles totales es mayor. La Figura 9 muestra que a la temperatura 110°C y posición de bandeja inferior el porcentaje de polifenoles totales es mayor.

En las Figuras 7, 8 y 9 se observa que un aumento en la temperatura de tostado provoca un descenso significativo en él porcentaje de polifenoles totales con respecto a los valores encontrados en almendras de cacao sin tostar.

Al comparar los resultados alcanzados en el presente estudio con los obtenidos a las condiciones de operación modalidad 1 de la Escuela de Chocolatería, es posible asegurar que la metodología más adecuada para tostar granos de

cacao en el horno tostador vertical es a una temperatura de 110 °C por un tiempo de 90 min y a una posición de bandeja media. Este hecho permite demostrar que las condiciones actuales de operación arrojan pérdidas en cuanto a porcentaje de polifenoles totales después del proceso de tostado. Ya que el análisis de los parámetros de operación más adecuados desarrollados en la investigación realizada, muestran que la recuperación de polifenoles totales es de 63,7±0,1) % en base a las almendras de cacao sin tostar, lo que excede en un (7,9±0,1) % con respecto a los polifenoles totales encontrados con el proceso de tostado que se emplea actualmente.

3.8. Factibilidad técnica y económica de la implementación de las condiciones establecidas en el diseño experimental

Para el estudio de la factibilidad técnico-económica se realizó, el siguiente cálculo empleando la Ecuación (1) [19]:

$$E = P \times T, \tag{1}$$

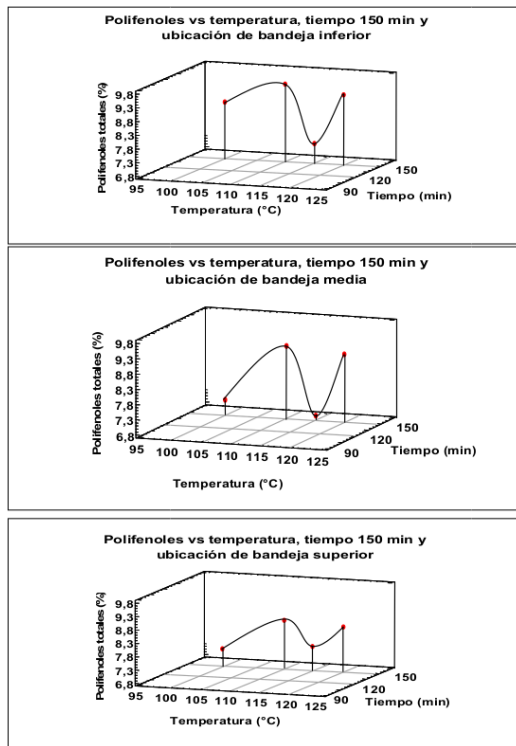


Figura 9: Efecto de la temperatura y posición de bandeja a tiempo 150 min constante de tostado en el porcentaje de polifenoles totales

dónde:

E : energía eléctrica kWh P : potencia eléctrica (kW) T : tiempo (horas)

Como dato se contó con la potencia del horno tostador vertical suministrada por el fabricante [5] la cual es de 2100 vatios. La Tabla 6 muestra la potencia consumida en un año de producción del horno basado en la modalidad 1 y condiciones propuestas, así como también los costos asociados a dicha potencia por días hábiles laborados al mes en Bs/kWh en ambas condiciones. En la Figura 9 se observa el comportamiento del costo en Bs/kWh en ambos casos a medida que aumenta la potencia en kWh en un año de producción.

En base a los resultados obtenidos en la Figura 10, al comparar se obtiene bajo las nuevas condiciones establecidas una ganancia de $(32,2 \pm 0,1)$ Bs/kWh al año sobre la modalidad 1, lo que equivale aún $(24,0 \pm 0,1)$ % menos en cuanto al costo cancelado actualmente.

Tabla 6: Potencia y costo producido por el horno tostador vertical de la Escuela de Chocolatería al año 2015 bajo la modalidad 1 y mejores condiciones propuestas

Meses	P_0	P_p	C_0	C_p
Enero	71,40	54,40	9,5	7,2
Febrero	75,60	57,60	10,1	7,7
Marzo	94,20	70,40	12,3	9,4
Abril	84,00	64,00	11,2	8,5
Mayo	84,00	64,00	11,2	8,5
Junio	94,20	70,40	12,3	9,4
Julio	94,20	70,40	12,3	9,4
Agosto	88,20	67,20	11,8	8,9
Septiembre	94,20	70,40	12,3	9,4
Octubre	88,20	67,20	11,8	8,9
Noviembre	88,20	67,20	11,8	8,9
Diciembre	58,80	44,80	7,8	5,9
Total	1015,2	768,2	134,4	102,2

P_0 : Potencia ($P \pm 0,02$) kWh condiciones actuales,
 P_p : Potencia ($P \pm 0,02$) kWh condiciones propuestas,
 C_0 : Costo ($Cost \pm 0,1$) Bs/kWh condiciones actuales,
 C_p : Costo ($Cost \pm 0,1$) Bs/kWh condiciones propuestas.

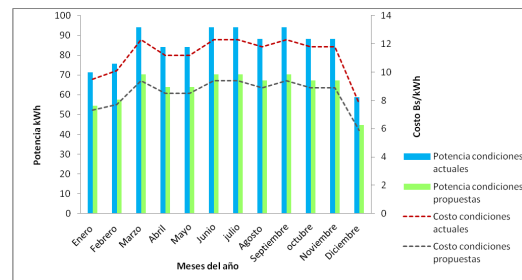


Figura 10: Comparación del comportamiento de la potencia kWh y el costo en Bs/kWh consumido por el horno tostador vertical en un año de producción en condiciones de operación actuales y condiciones de operación propuestas

3.9. Mejoras al medio ambiente y condiciones de operación

Los resultados obtenidos de la Tabla 6 muestran que la energía consumida a las nuevas condiciones establecidas de 110°C y 90 min producen un menor consumo de kilovatios/horas dando $(247,20 \pm 0,01)$ kWh menos al año, lo que conlleva un ahorro de energía, ya que por cada kilovatio/hora de electricidad menor consumido se evita la emisión de un kilogramo de CO_2 . La disminución obtenida equivale a $1/4$ de tonelada aproximadamente menos de CO_2 que va al

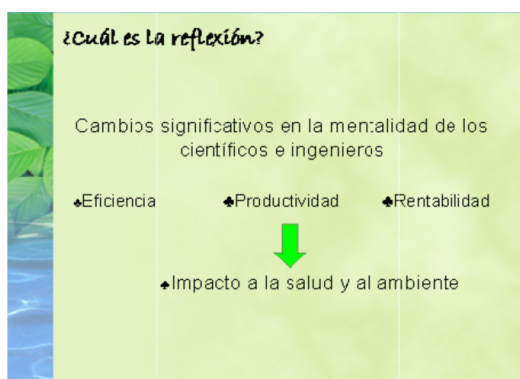


Figura 11: Criterios de ingeniería basados en factibilidad técnica, económica e impacto al medio ambiente

ambiente. Se obtuvo a su vez una disminución en el tiempo de proceso de 30 minutos que no afecta la producción total, lo que técnicamente se hace favorable, bien sea en el aprovechamiento de otra etapa del proceso y/o mejoras en el tiempo del personal técnico. En el presente trabajo tal y como se evidencia en la Figura 11 los criterios de ingeniería basados en factibilidad técnica y económica se ven complementados por considerar los impactos a la salud y el ambiente [20], esto es posible cuando se disminuyen los consumos energéticos que llevan a las emisiones de CO².

Para finalizar la Figura 12 se resumen los tres efectos alcanzados mediante las condiciones de operación propuestas, donde los costos y consumo energético disminuyen, dando lugar a un aumento del porcentaje de polifenoles totales el cual fue el propósito principal de este trabajo, considerando los muchos beneficios que aportan estos compuestos a la salud humana.

4. Conclusiones

Con la modificación del método preexistente, se logró una mayor extracción de los polifenoles totales provenientes de las almendras de cacao tostadas. Se determinó que existe una pérdida en el porcentaje de polifenoles totales de $(44,1 \pm 0,1) \%$ en almendras de cacao sometidas al proceso de tostado. La metodología más adecuada para tostar granos de cacao en el horno tostador vertical es a una temperatura de $(110,0 \pm 0,5) \text{ } ^\circ\text{C}$ a

$(90,0 \pm 0,5) \text{ min}$ para una posición de bandeja media, con una recuperación de $(7,9 \pm 0,1) \%$ mayor con respecto a los polifenoles totales obtenidos con las condiciones de operación actuales de la Escuela de Chocolatería. La condición propuesta en este estudio de $(110,0 \pm 0,5) \text{ } ^\circ\text{C}$ y $(90,0 \pm 0,5) \text{ min}$. Establece un ahorro en el costo actual de $(32,2 \pm 0,1) \text{ Bs/kWh}$ y conlleva a una disminución del consumo de energía de $(247,20 \pm 0,01) \text{ kWh}$ menos que a las condiciones actuales establecidas por la Escuela de Chocolatería.

Reconocimiento

El presente trabajo fue distinguido con la *Mención Publicación* por la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo

Agradecimiento

Al Ing. Cesar Liendo de la Escuela de Chocolatería de la ALBA ubicada en Maracay Estado Aragua- Venezuela, por toda la colaboración prestada en la logística de recolección de las muestras de Almendra de Cacao Tostadas

Referencias

- [1] Javier Campo Marquina et al. Venezuela se olvida del cacao. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (46), 2005.
- [2] Raúl Alulema-Rodríguez and Luis Granda-González. Plan estratégico para la producción y comercialización internacional de chocolates elaborados en base al cacao ecuatoriano. Trabajo de grado, Diplomado superior en gerencia de marketing, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, enero 2011. url: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1782>.
- [3] Y. Suazo. Efecto de la fermentación y el tostado sobre la concentración polifenólica y actividad antioxidante de cacao nicaragüense. Trabajo final de maestría, Departamento de tecnología en alimentos, Universidad Pública de Navarra, Navarra, España, 2012.
- [4] FC Padilla, AM Rincón, and L Bou-Rached. Polyphenol content and antioxidant activity of several seeds and nuts. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 58(3):303–308, 2008.
- [5] Instituto Nacional de Ingeniería, Hoyo de la Puerta, Miranda, Venezuela. *Especificaciones técnicas del horno tostador vertical*, 2009.

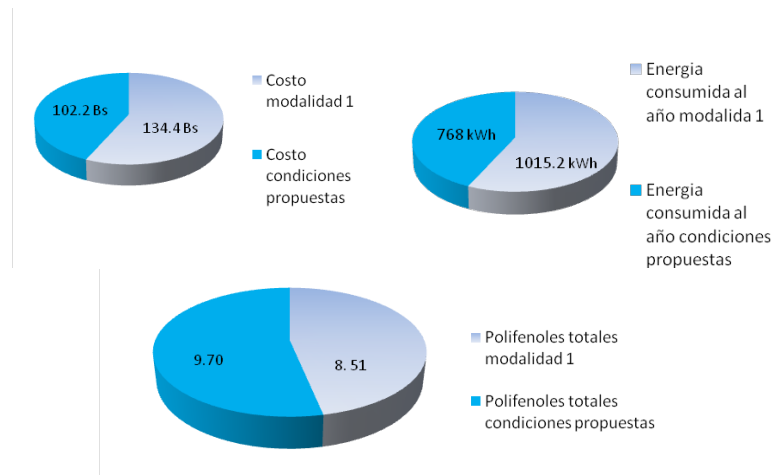


Figura 12: Efectos alcanzados mediante las condiciones de operación propuestas

- [6] M. Colina and M. Rivero. Determinación de polifenoles totales en almendras de cacao antes y después del proceso de tostado, mediante espectrofotometría uv-visible. Trabajo especial de grado, Facultad de Educación, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2013. Tutor: Lisbeth Manganiello.
- [7] Ruth K Price, Robert W Welch, Alison M Lee-Manion, Ian Bradbury, and JJ Strain. Total phenolics and antioxidant potential in plasma and urine of humans after consumption of wheat bran. *Cereal chemistry*, 85(2):152–157, 2008.
- [8] SK Khanna, PN Viswanathan, PS Krishnan, and GG Sanwal. Extraction of total phenolics in the presence of reducing agents. *Phytochemistry*, 7(9):1513–1517, 1968.
- [9] JE Cacace and G Mazza. Extraction of anthocyanins and other phenolics from black currants with sulfured water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21):5939–5946, 2002.
- [10] Ignacio Garrido, María Josefina Monagas Juan, Carmen Gómez-Cordovés, and Begoña Bartolomé. *Extracción de antioxidantes a partir de subproductos del procesado de la almendra*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España), 2007.
- [11] Elliott Middleton JR, Chithan Kandaswami, and Theoharis C Theoharides. The effects of plant flavonoids on mammalian cells: Implications for inflammation, heart disease, and cancer. *Pharmacological Reviews*, 52(4):673–751, 2000.
- [12] Clímaco Álvarez, Elevation Pérez, and Mary Lares. Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de cuyagua, estado aragua. *Agronomía Tropical*, 57(4):249–256, 2007.
- [13] Juan Edson Villanueva-Tiburcio, Luis Alberto Condezo-Hoyos, and Eduardo Ramirez Asquieri. Antocianinas, ácido ascórbico, polifenoles totales y actividad antioxidante, en la cáscara de camu-camu (*myrciaria dubia* (hbk) mcvaugh). *Food Science and Technology (Campinas)*, 30:151–160, 2010.
- [14] Teresa Oliviero, Edoardo Capuano, Bettina Cämmerer, and Vincenzo Fogliano. Influence of roasting on the antioxidant activity and hmf formation of a cocoa bean model systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(1):147–152, 2008.
- [15] Maureen Hernández Ángel and Elio Antonio Prieto González. Plantas que contienen polifenoles: Antioxidantes dentro del estilo de vida. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 18(1):12–14, 1999.
- [16] Marco Arlorio, Monica Locatelli, Fabiano Travaglia, Jean-Daniel Coisson, Erika Del Grosso, Alberto Minassi, Giovanni Appendino, and Aldo Martelli. Roasting impact on the contents of clovamide (n-caffeoyl-l-dopa) and the antioxidant activity of cocoa beans (*theobroma cacao* l.). *Food Chemistry*, 106(3):967–975, 2008.
- [17] Kenneth B Miller, William Jeffery Hurst, Mark J Payne, David A Stuart, Joan Apgar, Daniel S Sweigart, and Boxin Ou. Impact of alkalization on the antioxidant and flavanol content of commercial cocoa powders. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(18):8527–8533, 2008.
- [18] J. Díaz. Permeabilidad de la cascara de cacao en ácido acético: Evolución de la fermentación y efecto de la adición de células antes del secado, acidez en el producto final. Tesis de maestría, Escuela Superior de Agricultura de Lavras, Brasil, 2012.
- [19] Grupo ICE. *Calcule el consumo de electricidad*. url: <http://www.grupoice.com/>.
- [20] Lisbeth Manganiello. Clases de química ambiental. Área de estudios de postgrado. Facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela, 2006.

Meta-optimization of harmony search

Alejandro Centeno, Cristóbal Vega, Demetrio Rey-Lago*

Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

In the field of optimization meta-heuristics they have repeatedly demonstrated their abilities as numerical methods applied in the resolution of their associated models. However, the performance of these methods suffers from a strong dependence on instances or values assigned to its parameters. This paper presents the implementation of a proposal that allows the optimal instantiation of Harmony Search Algorithm parameters in conjunction with the generation of information about their behavior. The results obtained in this study are important and relevant as showing that the parameter settings calculated by the proposal meta-optimizing here implemented provided the Harmony Search Algorithm the ability to solve instances of problems treated with high levels of efficiency and effectiveness.

Keywords: parameter tuning; Meta-optimization; Harmony Search Algorithm

Meta-optimización de la búsqueda armónica

Resumen.-

En el ámbito de la optimización las meta-heurísticas han demostrado reiteradamente sus capacidades como métodos numéricos aplicados en la resolución de sus modelos asociados. Sin embargo, el rendimiento de estos métodos adolece de una fuerte dependencia respecto a las instancias o valores asignados a sus parámetros. Este trabajo expone la implementación de una propuesta que permite la instanciación óptima de los parámetros del Algoritmo de Búsqueda Armónica conjuntamente con la generación de información sobre su comportamiento. Los resultados obtenidos en este estudio son importantes y pertinentes, ya que demuestran que las configuraciones de parámetros calculadas por la propuesta meta-optimizadora aquí implementada brindaron al Algoritmo de búsqueda Armónica la capacidad de solucionar las instancias de los problemas tratadas con elevados niveles de eficiencia y eficacia.

Palabras clave: afinación de parámetros; meta-optimización; algoritmo de búsqueda armónica

Recibido: febrero 2016

Aceptado: abril 2016

1. Introducción

En el ámbito de la optimización las meta-heurísticas han demostrado reiteradamente sus capacidades como métodos numéricos aplicados en la resolución de sus modelos asociados. En un sentido amplio, la algoritmia de estos métodos está

integrada por operaciones de búsqueda y estado a través de las cuales orientan su proceso de generación y actualización de soluciones. Adicionalmente, estas operaciones incorporan parámetros en su estructura. No obstante sus capacidades, el rendimiento de toda metaheurística adolece de una fuerte dependencia respecto a las instancias o valores asignados a tales parámetros.

En este contexto, surge el problema de instanciar a un algoritmo meta-heurístico (PIAM) tal que obtenga o estime para éste el mejor rendimiento posible al resolver un problema de

* Autor para correspondencia

Correo-e: drey@uc.edu.ve (Demetrio Rey-Lago)

optimización. En el estado actual de las investigaciones, existen dos enfoques o esquemas principales sobre los está fundamentado el desarrollo de métodos y algoritmos para dar solución al PIAM, los cuales son comúnmente denominados como el control de parámetros y la afinación de parámetros (AP) [1, 2]. En el esquema de afinación los parámetros de una metaheurística, tras ser inicialmente instanciada, permanecen constantes durante toda la ejecución de la misma. La AP puede estar o no basada en modelos [2]. Enmarcado en el esquema de afinación no basado en modelos, se cuenta con la meta-optimización [3], [4], [5] o aplicación de una meta-heurística (algoritmo meta-optimizador) para afinar los parámetros de otra meta-heurística (algoritmo objetivo) [2].

El presente trabajo expone los resultados de la implementación de una propuesta meta-optimizadora que permite la afinación de los parámetros del Algoritmo de Búsqueda Armónica (ABA) [6] conjuntamente con la generación de información sobre su comportamiento. Como algoritmo meta-optimizador (MO) fue empleado al propio ABA, estableciéndose un lazo de retroalimentación entre los parámetros de éste y los asociados al algoritmo objetivo (AO). La propuesta desarrollada fue sometida a prueba sobre tres instancias de problemas de optimización no lineales y no restringidos.

Como antecedentes en los trabajos de meta-optimización de la ABA destacan los trabajos de Gandomi y Alavi [7], y Yang, *et al* [8]. Gandomi y Alavi proponen un algoritmo biológicamente inspirado, donde la manada de krill (KH) es usada para la solución de tareas de optimización. El algoritmo de KH está basado en la simulación del comportamiento de manada de individuos de krill. El algoritmo de KH es capaz de resolver de manera eficiente una amplia gama de problemas de optimización de referencia [7]. La realización de cualquier algoritmo dependerá en gran medida el ajuste de sus parámetros del algoritmo dependiente. El ajuste óptimo debe permitir que el algoritmo logre el mejor rendimiento para resolver una serie de problemas de optimización. Sin embargo, tales ajustes de parámetros es un problema de optimización difícil. Yang, *et al* presentan un

marco para los algoritmos de autoajuste para que un algoritmo a ser sintonizado puede ser usada para ajustar el propio algoritmo. Mediante el algoritmo de luciérnaga como un ejemplo, muestran que este marco funciona bien [8].

2. Afinación de Parámetros

Los algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza han sido cada vez más popular en los últimos años, y la mayoría de estos algoritmos meta-heurísticos han sido muy eficiente. el libro de Yang [9] se esfuerza en introducir los últimos avances en relación con los principales algoritmos inspirados en la naturaleza, en este libro recalca la necesidad de la afinación de parámetros. Esta necesidad de la afinación de los parámetros también resalta en el libro de Kaveh y Mahdavi [10].

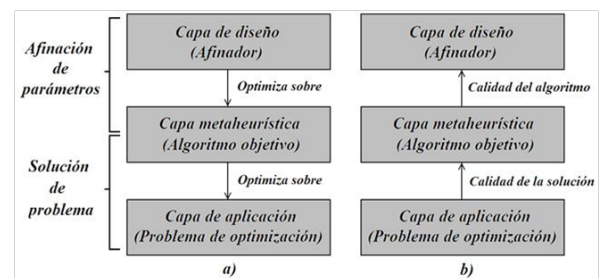


Figura 1: Estructura en capas de la afinación de parámetros. Las flechas mostradas en a) y b) denotan, respectivamente, el flujo de control e información entre las capas

A grandes rasgos, la resolución del PIAM a través de la aplicación de la AP es equivalente a resolver la instancia de un problema de optimización mediante una meta-heurística. Sin embargo, la AP constituye un meta-problema con respecto al proceso de optimización [2]. La Figura 1, bosqueja esta relación jerárquica entre el AO, ubicado en la capa meta-heurística e implementado sobre la capa de aplicación, y la capa superior o de diseño correspondiente a un método afinador implementado para afinar los parámetros del AO.

La dinámica esquematizada en la Figura 1 puede ser resumida en los siguientes términos: en la capa de diseño el afinador construye una configuración válida, conformada por todos los parámetros instanciados del AO, y la envía a

la capa meta–heurística donde es utilizada por éste a fin de resolver la instancia alojada en la capa de aplicación. A continuación, esta última capa envía el resultado sobre la calidad de la solución obtenida a la capa meta–heurística la cual, a su vez, retorna una evaluación sobre la calidad de desempeño del AO a la capa de diseño. Este proceso continuará hasta dar cumplimiento a condiciones de finalización preestablecidas.

3. Algoritmo de búsqueda armónica

Gran cantidad de problemas de optimización en numerosos campos han sido resueltos mediante multiples algoritmos de optimización. Métodos clásicos de optimización han jugado un rol importante en la solución de estos problemas. Pero, sus inconvenientes generan demanda de otros tipos de algoritmos. Sin embargo, aun existen posibilidades de diseñar nuevos algoritmos heurísticos basados en analogías con ena fenómeno natural o artificial. En este orden de ideas, Geem, et al [11] desarrollan el concepto de *algoritmo de búsqueda armónica (BA)*, (*HS* por Harmony Search), para el desarrollo del algoritmo de BA, los autores imitan la improvisación de los reproductores de música. Existen un número muy grande aplicaciones recientes del trabajo de Geem, et al [11], entre los cuales destacan los de Pereira, et al [12], y Einarsson [13].

4. Propuesta meta–optimizadora

4.1. Definición de símbolos y términos básicos

η : Número de parámetros asociados al AO.

p_i : i – ésimo parámetro asociado al AO.

η_i^{\min} : Cota inferior para los valores asumidos por

p_i .

η_i^{\max} : Cota superior para los valores asumidos por

p_i .

$[\bullet]$: Intervalo de números enteros.

$[\bullet]^T$: Operación de transposición.

\vec{p} : Configuración válida. $\vec{p} = [p_1 p_2 \dots p_p]^T$.

P : Instancia de problema de optimización conformada por el espacio factible y la función objetivo (FO).

X_n : Número de variables intervinientes asociadas a P .

\wp : Espacio de configuraciones válidas.

$\wp = \left\{ \vec{p} \vee p_i \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}] \quad \forall i \in [1; p] \right\}$.

Δx_{sol} : Tolerancia para la solución de P obtenida mediante el AO afinado.

$Eval_{Per}$: Máximo número de evaluaciones de la FO en una ejecución del AO.

$Eval_{nexPer}$: Máximo número de ejecuciones fallidas no consecutivas del AO.

$Eval_{exReq}$: Número requerido de ejecuciones exitosas del AO.

$Eval_{Per}$: Máximo número de ejecuciones del MO.

$Eval_{Max}$: Cota superior para $Eval_{Per}$.

4.2. Capa de aplicación

En esta capa fueron resueltos las siguientes instancias de problemas de optimización no lineales y no restringidos: Ackley [14], Sphere y Schwefel [15]. En lo sucesivo, estas instancias serán denotadas como P_1 , P_2 y P_3 respectivamente.

4.3. Capa meta–heurística

En esta capa fue implementado el AO con la estructura algorítmica descrita en [6]. Los parámetros sujetos al proceso de afinación fueron los siguientes: Tasa de consideración de la memoria de armonías (*HMCR*), tasa para el ajuste de nota (*PAR*), ancho de banda (*BW*) y el tamaño de la memoria de armonías (*HMS*).

4.4. Capa de diseño

En esta capa fue implementado implementó el MO con la estructura algorítmica descrita en [16].

5. Implemectación de la propuesta

- Se generó el código correspondiente en el entorno de matemática computacional GNU Octave 3.6.2 edición UPM. Para la implementación se utilizó una computadora personal dotada de procesador Intel® doble núcleo de 1,60 GHz con 500 MB de RAM.
- Configuración de \wp : $HMCR \in [0; 1]$, $PAR \in [0; 1]$, $BW \in [0; 1]$ y $HMS \in [1; 5]$.

Tabla 1: Parámetros del AO afinados según la P tratada

P	n	$HMCR$	PAR	BW	HMS	$Eval_{Per}$
P_1	2	0,8234	0,6243	$1,6062 \times 10^{-3}$	2	5502
	5	0,9205	0,2850	$1,2005 \times 10^{-3}$	3	20105
	10	0,9661	0,1384	$1,3269 \times 10^{-3}$	3	54203
	15	0,9803	0,1044	$1,5652 \times 10^{-3}$	3	106771
	20	0,9883	0,0785	$1,6401 \times 10^{-3}$	3	170702
P_2	2	0,8606	0,6083	$3,0080 \times 10^{-3}$	2	7486
	5	0,9306	0,3145	$1,7914 \times 10^{-3}$	2	27578
	10	0,9670	0,1847	$1,5403 \times 10^{-3}$	2	64447
	15	0,9786	0,1346	$1,2070 \times 10^{-3}$	2	126599
	20	0,9874	0,1075	$1,1156 \times 10^{-3}$	2	175481
P	2	0,8523	0,6223	$4,1219 \times 10^{-3}$	2	12196
	5	0,9267	0,3054	$3,0882 \times 10^{-3}$	2	44106
	10	0,9589	0,1809	$2,5575 \times 10^{-3}$	2	113171
	15	0,9696	0,1299	$2,0547 \times 10^{-3}$	2	208777
	20	0,9763	0,0983	$2,0303 \times 10^{-3}$	2	320424

- Configuración del MO: $Eval_{Per} = 10^7$, $Eval_{exReq} = 5$, $Eval_{Max} = 10^6$, $Eval_{nexPer} = 10^2$ y $\Delta x_{sol} = 10^{-5}$.
- Índices de rendimiento: tasa de éxito (TE) [2] y tiempo de primera visita esperado ($E(\tau)$) [17].
- Se efectuaron cien ejecuciones del MO para cada P tratada y $\forall n \in \{2, 5, 10, 15, 20\}$.

6. Resultados y análisis

A partir del promedio ponderado, computado sobre cada conjunto de valores obtenidos para los parámetros del AO, se estimaron las respectivas configuraciones afinadas. Para la ponderación fue empleada la tasa de entropía [18]. Los resultados están en la Tabla 1.

Se efectuaron cien ejecuciones del AO sobre cada P tratada, con $\Delta x_{sol} = 5 \bullet 10^{-5}$, instanciándolo con los valores de la Tabla 1. Los resultados obtenidos se condensan en la Tabla 2.

Teniendo presente que la TE constituye una medida de eficacia [19] resulta claro, en base a los datos mostrados en la tabla 2, que las configuraciones de parámetros computadas por el MO le han conferido al AO la capacidad de solucionar las instancias de problemas tratadas con un cien por ciento de acierto. Este resultado también

indica, a la luz del concepto de robustez [2], que las configuraciones de parámetros computadas por el MO se han traducido en instancias del AO robustas frente a su naturaleza estocástica como a las instancias de problemas tratadas. En lo que respecta a la eficiencia [19] exhibida por el AO afinado, la misma puede ser analizada a partir de la relación porcentual entre los valores mostrados en la tabla 2 para el índice $E(\tau)$ y las $Eval_{Per}$ mostradas en la Tabla 1. En este sentido, todas las instancias de problemas tratadas fueron resueltas por el AO afinado con la utilización en promedio de menos del cincuenta por ciento de las evaluaciones de la función objetivo permitidas.

Un segundo aspecto a considerar para el análisis viene dado por la caracterización del comportamiento exhibido por los parámetros del AO frente al número de variables intervinientes en las instancias de problemas tratadas. En este orden de ideas, se comenzó por efectuar una regresión lineal, vía mínimos cuadrados ordinarios (MCO), para el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 1 mediante el modelo $\ln(PAR) = a_1 \ln(n)$ con una confiabilidad del 95%. Los resultados de este procedimiento están resumidos en la Tabla 3.

Con fundamento en los resultados mostrados en la Tabla 3, fue formulada la relación empírica de la ecuación (1) entre la tasa para el ajuste de nota

Tabla 2: Índices TE y $E(\tau)$ obtenidos en cien ejecuciones del AO afinado según la P tratada

P	n	TE	$E(\tau)$	P	n	TE	$E(\tau)$	P	n	TE	$E(\tau)$
	2	1,00	2389		2	1,00	3551		2	1,00	5680
	5	1,00	9015		5	1,00	11460		5	1,00	20079
p_1	10	1,00	21364	p_2	10	1,00	26782	p_3	10	1,00	46951
	15	1,00	34397		15	1,00	46392		15	1,00	77565
	20	1,00	55777		20	1,00	66826		20	1,00	105671

Tabla 3: Resultados de los MCO en base a quince observaciones. Variable dependiente: $\ln(PAR)$

Parámetros	Coefficiente	Desviación típica	Estadístico t	Valor p
$\ln(n)$	-0,7766	$1,2795 \times 10^{-2}$	-60,6982	$2,3400 \times 10^{-18}$
Media de $\ln(PAR)$		-1,5879	Desviación típica de $\ln(PAR)$	0,7074
Suma de cuadrados de residuos		0,1697	Desviación típica de la regresión	0,1101
R-Cuadrado		0,9962	R-Cuadrado corregido	0,9962
F -valor		3684,2780	p -valor	$2,3400 \times 10^{-18}$
Log - verosimilitud		12,3297	Criterio de Akaike	-22,6595

y el número de variables intervinientes

$$PAR(n) = n^{-0,7766} \tag{1}$$

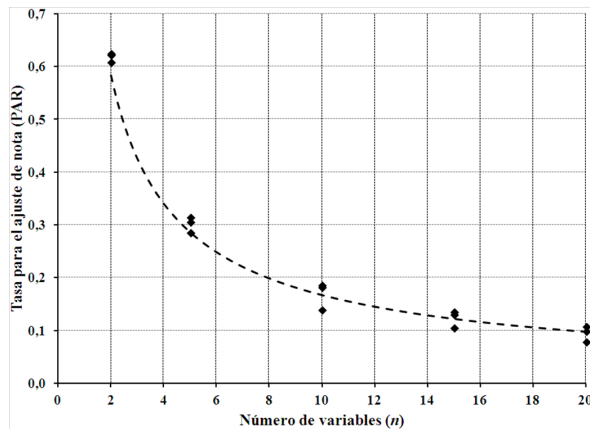


Figura 2: PAR contra n

La Figura 2 muestra en línea segmentada la gráfica para la relación (1) conjuntamente con las quince observaciones para la variable PAR correspondientes a la Tabla 1.

El comportamiento exhibido por PAR , conforme fue incrementado el número de variables intervinientes, resulta sumamente interesante a las luz de las siguientes consideraciones: En primer lugar, la demostración matemática planteada en [20], al

menos para instancias de problemas de optimización de tipo entero, sobre la equivalencia entre las Estrategias Evolutivas (EE) [21] y el ABA. En segundo lugar, la existencia de cierta evidencia empírica, a la par de algunos estudios de corte teórico, que ha brindado soporte a la idea de instanciar a la tasa de mutación en las EE, aplicadas sobre instancias de problemas definidas sobre espacios binarios, con un valor igual al inverso del número de variables intervinientes [21].

En cuanto al análisis sobre el comportamiento de la variable $HMCR$, se aplicó una regresión lineal para el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 1 mediante el modelo $HMCR = a_0 + a_1 PAR$ y con una confiabilidad del 95 %. Los resultados de este procedimiento están plasmados en la Tabla 4.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 4, en conjunción con la Ecuación (1), se formuló la relación empírica dada en la Ecuación (2) para la variable $HMCR$

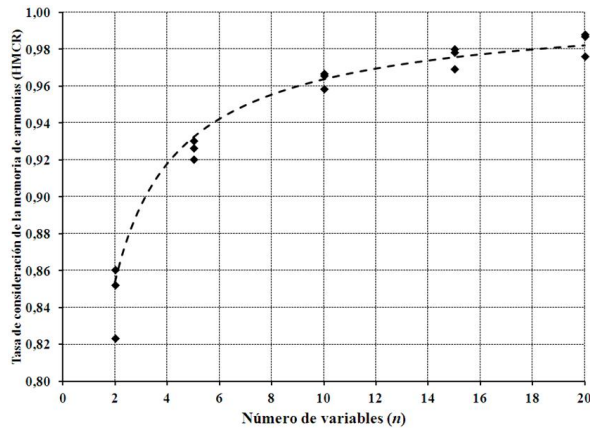
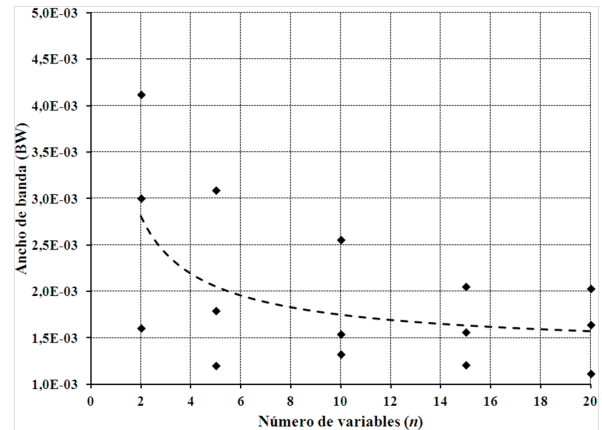
$$HMCR(n) = 1,0081 - 0,2640 \times n^{-0,7766} \tag{2}$$

La Figura 3 muestra en línea segmentada la gráfica para la Ecuación (2) conjuntamente con las quince observaciones para la variable $HMCR$ especificadas en la Tabla 1.

Claramente, la gráfica de la Figura 3 muestra un crecimiento de la variable $HMCR$ conforme n

Tabla 4: Resultados de los MCO en base a quince observaciones. Variable dependiente: *HMCR*

Parámetros	Coefficiente	Desviación típica	Estadístico <i>t</i>	Valor <i>p</i>
Constante	1,0081	$3,9298 \times 10^{-3}$	256,5000	$1,8100 \times 10^{-25}$
<i>PAR</i>	-0,2640	$1,2109 \times 10^{-2}$	-21,8000	$1,2700 \times 10^{-11}$
Media de <i>HMCR</i>		0,9391	Desviación típica de <i>HMCR</i>	$5,3372 \times 10^{-2}$
Suma de cuadrados de residuos	$1,0620 \times 10^{-3}$		Desviación típica de la regresión	$9,0360 \times 10^{-3}$
R-Cuadrado		0,9734	R-Cuadrado corregido	0,9713
<i>F</i> -valor		475,3921	<i>p</i> -valor	$1,2700 \times 10^{-11}$
Log - verosimilitud		50,3867	Criterio de Akaike	-96,7735

Figura 3: *HMCR* contra *n*Figura 4: *BW* contra *n*

umenta, resultado que concuerda perfectamente con el reportado por Crossley *et al.* [22] en sus experimentos sobre la afinación del ABA. Adicionalmente, nótese que para el caso límite ($n \rightarrow \infty$) la relación dada por (2) predice un comportamiento asintótico de *HMCR* ($HMCR \cong 1,0$) lo cual, considerando que $HMCR \in [0; 1]$, corrobora la validez de la aproximación planteada mediante esta expresión.

Para el análisis sobre el comportamiento exhibido por la variable *BW*, se aplicó una regresión lineal para el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 1 mediante el modelo $BW = a_0 + a_1 PAR$ y con una confiabilidad del 95 %. Los resultados de este procedimiento son resumidos en la Tabla 5.

En base a los resultados mostrados en la Tabla 5, y en conjunción con la Ecuación (1), se formuló la siguiente relación empírica para la variable *BW*:

$$BW(n) = (1,3233 + 2,5541 \times n^{-0,7766}) 10^{-3} \quad (3)$$

La Figura 4 muestra en línea segmentada la

gráfica para la Ecuación (3) conjuntamente con las observaciones para la variable *BW* especificadas en la Tabla 1. Nótese en dicha figura que, de manera similar al comportamiento exhibido por la variable *PAR*, el ancho de banda muestra una tendencia decreciente conforme aumenta el número de variables intervinientes.

En relación al comportamiento exhibido por *HMS*, y aun cuando a través de la inspección de la tabla 1 se verifica la incidencia prácticamente nula del número de variables sobre este parámetro, se aplicó una regresión lineal para el ajuste de los datos mostrados en dicha tabla mediante el modelo $HMS = a_0$ con una confiabilidad del 95 %. Los resultados están resumidos en la Tabla 6.

La Figura 5 muestra en línea segmentada la gráfica para el modelo $HMS = a_0$ conjuntamente con las observaciones para este parámetro especificadas en la Tabla 1.

Finalmente, en lo que respecta al comportamiento exhibido por *Eval_{per}*, se aplicó una regre-

Tabla 5: Resultados de los MCO en base a quince observaciones. Variable dependiente: *BW*

Parámetros	Coefficiente	Desviación típica	Estadístico <i>t</i>	Valor <i>p</i>
Constante	$1,3233 \times 10^{-3}$	$3,1022 \times 10^{-4}$	4,2660	$9,0000 \times 10^{-4}$
<i>PAR</i>	$2,5541 \times 10^{-3}$	$9,5594 \times 10^{-4}$	2,6720	$1,9200 \times 10^{-2}$
Media de <i>BW</i>	$1,9900 \times 10^{-3}$	Desviación típica de <i>BW</i>		$8,5600 \times 10^{-4}$
Suma de cuadrados de residuos	$6,6200 \times 10^{-6}$	Desviación típica de la regresión		$7,1300 \times 10^{-4}$
R-Cuadrado	0,3545	R-Cuadrado corregido		0,3048
<i>F</i> -valor	7,1386	<i>p</i> -valor		$1,9198 \times 10^{-2}$
Log - verosimilitud	88,4723	Criterio de Akaike		-172,9447

Tabla 6: Resultados de los MCO en base a quince observaciones. Variable dependiente: *HMS*

Parámetros	Coefficiente	Desviación típica	Estadístico <i>t</i>	Valor <i>p</i>
Constante	2,2667	0,1182	19,1800	$1,900 \times 10^{-11}$
Media de <i>HMS</i>	2,2667	Desviación típica de <i>HMS</i>		0,4577
Suma de cuadrados de residuos	2,9333	Desviación típica de la regresión		0,4577
R-Cuadrado	0,0000	R-Cuadrado corregido		0,0000
Log - verosimilitud	-9,0447	Criterio de Akaike		20,0895

Tabla 7: Resultados de los MCO en base a quince observaciones. Variable dependiente: *Eval_{Per}*

Parámetros	Coefficiente	Desviación típica	Estadístico <i>t</i>	Valor <i>p</i>
<i>n</i>	10076,0000	927,0010	10,8700	$3,2900 \times 10^{-8}$
Media de <i>Eval_{Per}</i>	97169,8700	Desviación típica de <i>Eval_{Per}</i>		90724,8400
Suma de cuadrados de residuos	$2,7200 \times 10^{10}$	Desviación típica de la regresión		44088,6100
R-Cuadrado	0,8941	R-Cuadrado corregido		0,8941
<i>F</i> -valor	118,1448	<i>p</i> -valor		$3,2900 \times 10^{-8}$
Log - verosimilitud	-181,1760	Criterio de Akaike		364,3520

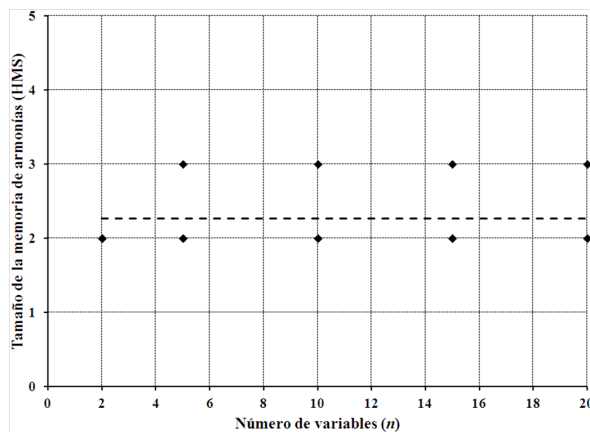


Figura 5: *HMS* contra *n*

una confiabilidad del 95 %. Los resultados de este procedimiento están en la Tabla 7.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 7, fue formulada la siguiente relación empírica para la variable *Eval_{Per}*

$$Eval_{Per}(n) = 10076 \times n. \tag{4}$$

La Figura 6 muestra en línea segmentada la gráfica para la Ecuación 4 conjuntamente con las observaciones para la variable *Eval_{Per}* especificadas en la Tabla 1.

Si bien es cierto que las relaciones empíricas dadas por Ecuaciones (1) a (4) están ajustadas razonablemente bien a los datos experimentales obtenidos, también lo es el hecho de que en principio las mismas son válidas solo para los valores de *n* analizados. Sin embargo, cabe la posibilidad

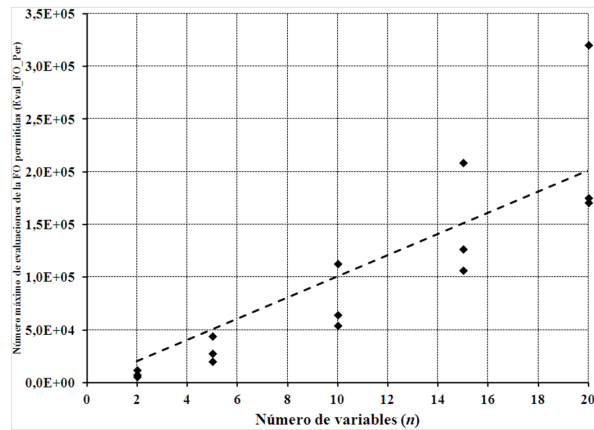
sión lineal para el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 1 mediante el modelo $Eval_{Per} = n$ con

Tabla 8: Configuración de parámetros calculadas para $n = 30$

n	$HMCR$	PAR	BW	HMS	$Eval_{Per}$
30	0,9892	0,0713	$1,5053 \times 10^{-3}$	2	302279

Tabla 9: Resultados comparativos para el AO afinado (A) y no afinado (NA) con $n = 30$

	P_1		P_2		P_3	
	A	NA	A	NA	A	NA
TE	1,00	0,68	1,00	0,77	1,00	0,63
$E(\tau)$	76456	238601	93273	221417	188382	244657

Figura 6: $Eval_{Per}$ contra n

de estudiar qué tan capaces son estas relaciones de predecir configuraciones de parámetros con la finalidad de solucionar las instancias de problemas tratadas para valores de n superiores. Esto constituye un aspecto fundamental, considerando que la meta-optimización está caracterizada por ser onerosa desde el punto de vista de los recursos computacionales que demanda su aplicación [3].

En este orden de ideas, la Tabla 8 resume las configuraciones de parámetros calculadas para $n = 30$ a partir de las precisadas relaciones. Para el tamaño de la memoria de armonías se asignó $HMS = 2$.

Para propósitos de comparación, se procedió a efectuar cien ejecuciones independientes del AO (afinado), sobre P_1 , P_2 y P_3 , instanciándolo con las configuraciones de la Tabla 8. Adicionalmente, fueron efectuadas cien ejecuciones independientes del AO (no afinado), sobre las mismas instancias

de problemas, pero instanciando a los parámetros $HMCR$, PAR , BW y HMS con los valores sugeridos en [15] los cuales, actualmente, son de aplicación casi universal para las instancias de problemas tratadas y similares. Ambos conjuntos de ejecuciones se efectuaron para $n = 30$ con la misma semilla, valor de tolerancia $\Delta x_{sol} = 5 \times 10^{-5}$, e idénticos valores asignados de acuerdo a la Tabla 8 para el parámetro $Eval_{FO_{Per}}$. Los resultados de estas ejecuciones han sido resumidos en la Tabla 9. Constaté el incremento en los niveles de eficacia y eficiencia, respecto a las instancias no afinadas, proporcionado por las instancias afinadas.

7. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se demostró que las configuraciones de parámetros computadas por la propuesta meta-optimizadora implementada le brindaron al ABA la capacidad de solucionar las instancias de problemas tratadas con elevados niveles de eficiencia y eficacia. Adicionalmente, los datos obtenidos permitieron desarrollar un análisis sobre el comportamiento exhibido por los parámetros asociados a este algoritmo respecto al número de variables intervinientes. Las relaciones empíricas obtenidas a partir de este análisis ofrecieron la posibilidad de predecir configuraciones de parámetros, considerando un número de variables intervinientes superior y previamente no considerado para el proceso de afinación, que se tradujeron en instancias del ABA más eficientes y eficaces

que las derivadas a partir de las configuraciones comúnmente utilizadas en la actualidad.

Referencias

- [1] Agoston Endre Eiben, Robert Hinterding, and Zbigniew Michalewicz. Parameter control in evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(2):124–141, 1999.
- [2] Agoston E Eiben and Selmar K Smit. Parameter tuning for configuring and analyzing evolutionary algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):19–31, 2011.
- [3] Magnus Erik Hvass Pedersen. *Tuning & simplifying heuristical optimization*. PhD thesis, Computational Engineering and Design Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Southampton, England, 2010.
- [4] Robert Nowotniak and Jacek Kucharski. Meta-optimization of quantum-inspired evolutionary algorithm. In *Proc. XVII Int. Conf. on Information Technology Systems*, volume 1, pages 1–17, 2010.
- [5] Roberto Ugolotti and Stefano Cagnoni. Analysis of evolutionary algorithms using multi-objective parameter tuning. In D. Arnold (Presidente), editor, *Proceedings of the 2014 conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO 2014)*, pages 1343–1350, Vancouver, BC, Canada., 2014. ACM.
- [6] Kang Seok Lee and Zong Woo Geem. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(36):3902–3933, 2005.
- [7] Amir Hossein Gandomi and Amir Hossein Alavi. Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12):4831–4845, 2012.
- [8] Xin-She Yang, Suash Deb, Martin Loomes, and Mehmet Karamanoglu. A framework for self-tuning optimization algorithm. *Neural Computing and Applications*, 23(7-8):2051–2057, 2013.
- [9] Xin-She Yang. *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, 2014.
- [10] Ali Kaveh and VR Mahdavi. *Colliding Bodies Optimization: Extensions and Applications*. Springer, 2015.
- [11] Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, and GV Loganathan. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2):60–68, 2001.
- [12] Clayton R Pereira, Rodrigo YM Nakamura, Kelton AP Costa, and João P Papa. An optimum-path forest framework for intrusion detection in computer networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(6):1226–1234, 2012.
- [13] Gudmundur Einarsson. Competitive coevolution in problem design and metaheuristic parameter tuning. Magister scientiarum thesis, Faculty of Physical Sciences, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Reykjavik, Iceland, May 2014.
- [14] Momin Jamil and Xin-She Yang. A literature survey of benchmark functions for global optimisation problems. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 4(2):150–194, 2013.
- [15] Ahangaran Milad. Harmony search algorithm: strengths and weaknesses. *Journal of Computer Engineering and Information Technology*, 2(1):1–7, 2013.
- [16] Alejandro Centeno. Estudio analítico del algoritmo de búsqueda armónica con aplicación en la resolución de problemas de optimización no lineales. Trabajo de grado de maestría, Área de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2016.
- [17] Anne Auger and Benjamin Doerr. *Theory of randomized search heuristics: Foundations and recent developments*, volume 1. World Scientific, Hackensack, New Jersey, EE.UU, 2011.
- [18] Petter Krus and Johan Ölvander. Performance index and meta-optimization of a direct search optimization method. *Engineering Optimization*, 45(10):1167–1185, 2013.
- [19] Thomas Bartz-Beielstein. *New experimentalism applied to evolutionary computation*. PhD thesis, Universität Dortmund, Dortmund, Germany, 2005.
- [20] Dennis Weyland. A critical analysis of the harmony search algorithm—how not to solve sudoku. *Operations Research Perspectives*, 2(1):97–105, 2015.
- [21] Hans-Georg Beyer and Hans-Paul Schwefel. Evolution strategies—a comprehensive introduction. *Natural computing*, 1(1):3–52, 2002.
- [22] Matthew Crossley, Andy Nisbet, and Martyn Amos. Quantifying the impact of parameter tuning on nature-inspired algorithms. In P. Lio, O. Miglino, G. Nicosia, S. Nolfi, and M. Pavone, editors, *European Conference on Artificial Life*, pages 925 – 932, Taormina, Italy, 2013. MIT Press.

Seismic testing of intelligent buildings to measure lateral displacement (Portico Structures)

Marlyn S. Silva O., Francisco Soto*

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

This work provides a description of a system that allows for measuring regular buildings made up of prefabricated concrete porticos designed for measuring lateral displacement under a seismic load with the goal of ensuring that in a given event the limit values of the quotient between the lee and the height of inter-floor space as specified in the Venezuelan norms stipulated in COVENIN 1756-1:2001 *Edificaciones Sismorresistentes* (Earthquake Resistant Buildings); and the automated, intelligent adaptation of the structure to make measuring procedures easier and thus estimate when the normative values have been exceeded, considering certain criteria at the time of taking the measurements. This system allows for generalizing the results in order to develop a methodology for the seismic measurement of buildings as stipulated in the Venezuelan Norm.

Keywords: seismic measurement; measure of displacement; intelligent buildings; methodology for measuring

Instrumentación sísmica de edificios inteligentes para la medición de desplazamientos laterales (Estructuras Aporticadas)

Resumen.-

Este Trabajo proporciona la descripción de un sistema que permite la instrumentación de edificios regulares constituidos por pórticos de concreto armado para la medición de sus desplazamientos laterales bajo efecto de cargas sísmicas, con el fin de verificar que ante la presencia de un evento dado no son superados los valores límites del cociente entre la deriva y la altura de entrepiso especificado en la Norma Venezolana COVENIN 1756-1:2001 *Edificaciones Sismorresistentes*; y la adaptación del mismo de forma automatizada e inteligente a la estructura para hacer más eficientes los procedimientos de medición y así estimar cuándo han sido superados los valores normativos, considerando ciertos criterios al momento de realizar la instrumentación. A partir del sistema descrito se realiza una generalización de los resultados para ofrecer una metodología para la instrumentación sísmica de edificios como aporte a la Norma Venezolana.

Palabras clave: instrumentación sísmica; medición de desplazamientos; edificios inteligentes; metodología de instrumentación

Recibido: noviembre 2015

Aceptado: marzo 2016

1. Introducción

La instrumentación de edificios con el objetivo de cuantificar sus características y verificar criterios de comportamiento estructural ante sismos ha tenido un gran auge en los últimos años [1]. Con la finalidad de establecer una serie de criterios que sean de utilidad para la selección de los instrumentos, su ubicación, disposición y

*Autor para correspondencia

Correo-e: fsoto@postgrado.uc.edu.ve (Francisco Soto)

procedimiento de medición, el presente trabajo pretende describir un sistema que permita la instrumentación sísmica de estructuras aporricadas con el fin de medir sus desplazamientos laterales, y su implementación y adaptación a edificios inteligentes y a la vez presentar una propuesta que sirva de referencia al momento de realizar la instrumentación y posean la flexibilidad de adaptación a un caso particular como aporte a la Norma Sísmica Venezolana.

2. Marco teórico

Las presiones que se generan en la corteza terrestre liberan energía en forma de ondas que inducen vibraciones en las estructuras a través de sus bases originando desplazamientos de cada una de las masas de la edificación con respecto a su posición de equilibrio estático proporcionales al producto de una función de la posición de la masa por una función del tiempo, que constituyen la respuesta de la estructura al movimiento de inducido [2].

Esta respuesta se puede cuantificar mediante el empleo de transductores en los que la corriente aplicada entre los extremos de dos placas móviles de un condensador (denominadas “masa móvil”) generan un desplazamiento con respecto a la placa central del transductor, dando lugar a una señal de corriente alterna de la misma frecuencia que el oscilador que es directamente proporcional a la magnitud medida [3]. Esta corriente puede ser convertida a un valor de voltaje con un ancho de banda de aproximadamente 200 Hz.

El procesamiento de estas señales se hace complejo y debe ser transformado mediante el análisis de Fourier al dominio de frecuencia para obtener el Espectro de Respuesta, el cual es la representación gráfica de algún parámetro básico, como la aceleración para distintos valores de periodo “T” [4].

Siendo la transformada de Fourier de la función real una función compleja

$$F_{(\omega)} = R_{(\omega)} + I_{(\omega)}i.$$

La curva generada se descompone en una serie de senos y cósenos llamada “Serie de Fourier”,

la cual para una curva Y en función de x tiene la forma

$$Y = \sum_{-\infty}^{\infty} \{a_n \text{sen}(n\omega x) + b_n \text{cos}(n\omega x)\},$$

con

$$\omega = \frac{2\pi}{x_2 - x_1},$$

donde a_n y b_n son los Coeficientes de Fourier, el módulo de esta función es lo que se conoce como el “Espectro de Fourier”

$$\|F_{(\omega)}\| = \left[R_{(\omega)}^2 + I_{(\omega)}^2 \right]$$

y el ángulo

$$P_{(\omega)} = \arctan\left(\frac{I_{(\omega)}}{R_{(\omega)}}\right)$$

es lo que se conoce como Fase del espectro. La variación de los máximos de la aceleración puede representarse gráficamente en forma de curvas espectrales y obtener a partir de él los espectros de velocidades y desplazamientos a través de un proceso de doble integración [5], reduciendo de este modo errores en el cálculo. Para ello se recurre al uso de sistemas de medición integrados a la estructura.

Existen muchas referencias con los aspectos teóricas de los temas tratados en esta investigación, entre las cuales destacan el trabajo de Lombardi y Bhattacharya [6] y la publicación de Luna y colaboradores [7].

3. Metodología del trabajo

- Se escogió para la investigación una estructura real constituida por pórticos de concreto armado, de altura 27.85 m., diseñada atendiendo a lo requisitos de las Normas COVENIN-MINDUR 2002-88, 1756-98, 1753-87 y situada en una zona sísmica 5
- Se definió como objetivo de la instrumentación verificar que no se superen los valores normativos del cociente de la deriva y la altura de entrepiso bajo acciones sísmicas, y que la edificación responda de forma

inteligente ante la posibilidad de exceder el valor normativo emitiendo una señal de aviso de forma automatizada.

- La magnitud seleccionada a medir es el desplazamiento lateral, por ser la deriva es una medida indirecta que depende de este parámetro y el valor restringido por la Norma [8].

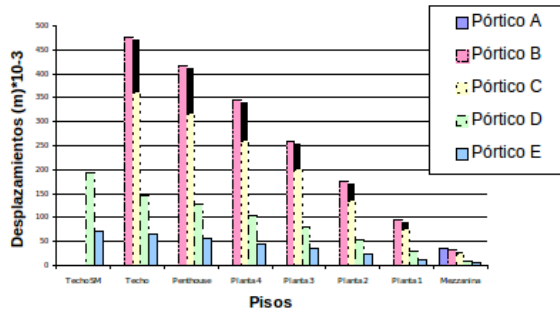


Figura 1: Desplazamientos de los Pórticos A al G en dirección X

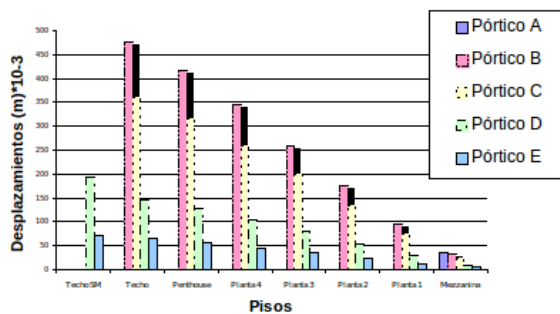


Figura 2: Desplazamientos de los Pórticos A al G en dirección Y

- Se obtienen los desplazamientos y derivas laterales de cada uno de los pisos de la edificación, bajo efecto de un sismo de diseño en base a su zonificación sísmica, las características del suelo de fundación (según estudio de suelos) y las cargas de la misma utilizando el programa de cálculo IP3 versión 7.0. Los desplazamientos teóricos calculados para cada uno de los distintos niveles se

presentan a continuación, la Figura 1 muestra los desplazamientos laterales de los pórticos A al G en dirección X y la Figura 2 en dirección Y.

- Se investigó sobre la tecnología disponible en la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y en la Nave de Ensayos Especiales del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela; para escoger el tipo de instrumento a utilizar, de entre los que se usan ya en nuestro país.



Figura 3: Vista Interna de un Acelerógrafo Etna con EpiSensor Interno

- Debido a la incertidumbre en la ocurrencia de un evento sísmico, se selecciono el acelerógrafo para registros fuertes Etna de Kinematics por su característica de autonomía, ya que realiza el registro del evento de forma automatizada. Este equipo consta en general de un acelerómetro triaxial interno, un amplificador de señal, un software integrado para el tratamiento de la señal, tarjeta madre, microprocesador, sistema GPS para la ubicación del punto de medición, baterías y tarjetas de memoria [9]. En la Figura 3 se observa una vista interna del equipo.

- Se consultó la normativa existente en nuestro país en cuanto a los valores límites de la deriva y lo referente al tipo, número de instrumentos y la ubicación de estos, al igual que las limitaciones de espacio físico de la estructura para la ubicación de los equipos.
- Se consideró la influencia del ambiente (cambios de temperatura, ruido, viento, etc.) en la escogencia del tipo de instrumentos y la experiencia del personal de FUNVISIS como personal calificado para la asesoría técnica.
- Para la instalación, calibración y mantenimiento de los equipos se atendió a las indicaciones del fabricante, los lineamientos normativos existentes y la experiencia del personal de FUNVISIS.
- Se consideró el nivel tanto económico como cultural de los habitantes de la edificación que garantice que los equipos se mantendrán en la edificación y que recibirán su adecuado mantenimiento (factor que en la actualidad será considerado en futuros proyectos debido a las experiencias acumuladas en varios años, aunque no se plantea en la Norma).

4. Propuesta de instrumentación

4.1. Equipos de medición

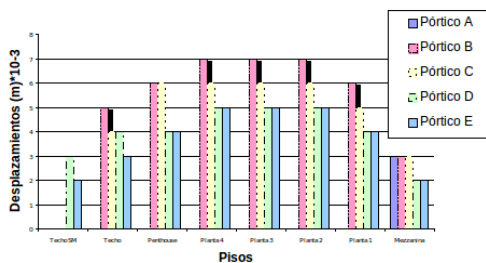


Figura 4: Derivas laterales de los Pórticos A al G en dirección Y

- Se utilizarán dos equipos, uno en la planta tres y otro en la cuatro; ya que el mayor desplazamiento relativo teórico de la estructura

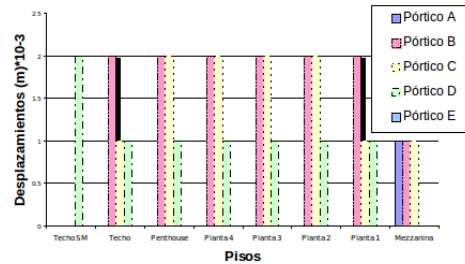


Figura 5: Derivas Laterales de los Pórticos A al G en Dirección X

para el sismo de diseño se registró entre estos entrepisos (obsérvese los valores de deriva en las Figuras 4 y 5 para ambas direcciones principales y para la combinación de efectos.

- Se decide colocar los acelerógrafos en una habitación de dimensiones 2.22 m. por 1.70 m cercana al centro de masa de cada piso, dentro de un closet de 1.05 m. por 0.50 m. para mantenerlo resguardado y lejos de las áreas de circulación. El lugar de colocación de los aparatos se encuentra cercano al centro de masas para evitar los errores en la medición por efectos de torsión [10].
- Ambos acelerógrafos se colocarán alineados verticalmente para asegurar que los desplazamientos absolutos estén referenciados respecto de una misma vertical.
- Los equipos estarán atornillados a la losa de piso para evitar desprendimiento del Epi-Sensor interno [10], la cual será maciza en la zona de colocación del instrumento para proporcionar una zona de anclaje más rígida.
- La orientación de cada EpiSensor coincidirá con los ejes principales de la edificación, con la finalidad de poder comparar los desplazamientos con los obtenidos para el sismo de diseño.
- Se utilizarán solo dos canales de medición que correspondan con la aceleración en las dos direcciones principales de la edificación.

- Los equipos no se conectarán entre sí mediante cables sino que se programarán para que cada canal de un sensor se active al registrarse el evento de interés, de modo que el al activarse cualquier canal todos los restantes comiencen simultáneamente la medición y el acelerógrafo responda al estímulo.

4.2. Descripción del Sistema de Respuesta Automatizado

- Dos acelerógrafos Etna
- Línea telefónica residencial de CANTV y línea neutra para proveer descarga a tierra (esto se refiere a la instalación completa del sistema telefónico, cableado, cajetines, etc.).
- Adaptador para conectar la línea telefónica al equipo (conector macho de 25 pines que provee kinematics junto con los acelerógrafos).
- Una computadora con los programas QuickTalk y QuickLook (cabe destacar que el usuario puede desarrollar sus propios programas para procesar la información).
- Cable de conexión RS-232 de kinematics para conectar la computadora al puerto de comunicaciones.

5. Metodología para la instrumentación sísmica de edificios

Se propone a continuación una metodología para realizar la instrumentación de edificaciones bajo efecto de cargas sísmicas, como aporte adicional de este trabajo.

1. Definir el o los objetivos de la instrumentación.
2. Escoger la edificación a instrumentar:
 - La selección de la edificación es función de los objetivos propuestos.
 - Las autoridades nacionales, estatales o municipales determinarán la necesidad de instrumentar una edificación para conocer su respuesta a las acciones sísmicas” [10].

- A FUNVISIS le corresponde coordinar la elección y distribución de sitios y registros [10].

3. Seleccionar la magnitud a medir:

- Preferiblemente la aceleración, ya que ofrece la posibilidad de proporcionar la velocidad y el desplazamiento en el punto de medición a través de un proceso de doble integración.

4. Establecer las características de la edificación que definen su respuesta a la acción sísmica:

- Peso de la edificación, forma de la(s) planta(s), uso, período natural de vibración, etc.

5. Preseleccionar los instrumentos más adecuados a las condiciones dadas:

- Estudiar sus características propias, ventajas y desventajas.
- En el caso del registro de movimientos fuertes utilizar acelerógrafos digitales [10].
- Para otro tipo de registros utilizar el instrumento que se considere adecuado siempre y cuando cuente con la aprobación de FUNVISIS [8].

6. Cumplir con las disposiciones normativas existentes aplicándolas al caso en estudio:

- En edificios con más de seis niveles ó área de construcción mayor o igual a 6.000 m², se colocarán tres equipos de medición; estos se ubicarán en la base, en el tope y el último en campo libre en un área representativa del perfil geotécnico [10].
- En edificios con más de diez niveles no importa el área construida, se colocarán cuatro equipos de medición; estos se ubicarán en la base, a media altura, en el tope y el último en campo libre en un área representativa del perfil geotécnico [10].

7. Ubicar los equipos en áreas que permitan la operación óptima de los mismos, su transporte, colocación, mantenimiento, reparación y calibración de forma segura:
 - Deberán estar interconectados entre sí para garantizar registros simultáneos, alineados verticalmente, lejos de las áreas de circulación y de fácil acceso [10].
 - Para registros fuertes, colocarlos sobre la losa de piso si poseen sensor interno, en caso contrario pueden colocarse en paredes y estantes; preferiblemente en los centros de masa de cada planta para evitar que efectos de la torsión introduzcan errores en la medición.
8. Considerar la influencia del ambiente sobre los equipos:
 - Verificar que los cambios de temperatura, variaciones locales de capacidad, variaciones de tensión en la superficie, radiación nuclear y vibraciones producidas en dirección distinta a la de medición no afecten la sensibilidad de los mismos.
 - No colocar cables en las proximidades de máquinas en funcionamiento para evitar el ruido electromagnético.
 - Asegurar las conexiones no estancas con resinas epóxicas y no colocar equipos en contacto directo con sustancias corrosivas.
9. Contratar personal calificado para la instalación, manejo, calibración y mantenimiento de los equipos, así como para la recuperación de la información:
 - Solicitar asesoría técnica del personal de FUNVISIS [10].
10. Cumplir las medidas de seguridad recomendadas por el fabricante del equipo y el personal que labora en FUNVISIS.
11. Realizar el mantenimiento con la frecuencia especificada por el fabricante:
 - Este lapso de tiempo no será mayor que el establecido por la Norma y la calibración de los equipos deberá hacerse cada tres meses [10].
12. Evaluar el nivel económico y cultural de los habitantes de la edificación.
13. Seleccionar los equipos, su interconexión y el procedimiento de medición y recuperación de la información.

6. Conclusiones

De los resultados de este trabajo hay que destacar los aspectos siguientes.

La instrumentación sísmica para medir desplazamientos laterales en edificios de forma inteligente y automatizada es factible. Los criterios a considerar en el proceso de instrumentación son: el objetivo, la magnitud a medir, tipos de instrumentos, características de la estructura, lineamientos normativos, requerimiento de espacio físico, influencia del ambiente, personal calificado, seguridad, mantenimiento y costos. El objetivo de la instrumentación es el criterio más importante a considerar para planear la selección e instalación de los equipos.

Las características propias de la estructura como el peso, forma, uso y sistema estructural influyen en la respuesta de la misma ante cargas sísmicas. El factor que ejerció una influencia significativa en la elección del equipo de medición fue el tipo de carga bajo la cual se realizó el estudio (cargas sísmicas), siendo la magnitud a medir la que definió la elección de acelerógrafos y al Etna por su autonomía.

El máximo desplazamiento lateral relativo teórico bajo el sismo de diseño se presentó entre las plantas tipo tres y cuatro. El cálculo de los desplazamientos laterales bajo el sismo de diseño permitió definir el sitio de colocación de los equipos y el número de ellos, sin embargo los detalles exactos de la instalación dependen de las condiciones locales.

Las disposiciones de la Norma Venezolana COVENIN 1756-1: 2001 fueron el punto decisivo en la elección del número de equipos a colocar, y la ubicación de los mismos en cada planta.

Recomendaciones

Para modificaciones posteriores de la Norma Sísmica Venezolana, se recomienda la incorporación de los criterios de instrumentación propuestos, a manera de establecerlos como pautas y referencia al momento de realizar el proyecto de instrumentación con la finalidad de hacer más eficientes las acciones a seguir y permitir una mejor evaluación de los parámetros estipulados en función de los requerimientos de un proyecto en particular.

Considerar para proyectos futuros el nivel socio-cultural de los habitantes de la edificación en la selección tanto de la estructura a instrumentar como del tipo de instrumentos, basándose en las experiencias acumuladas en los últimos años por el personal de FUNVISIS.

Referencias

- [1] Nathan Mortimore Newmark, Emilio Rosenblueth, and José Luis Lepe. *Fundamentos de ingeniería sísmica*. Diana, 1982.
- [2] Enrique Bazán and Roberto Meli. *Diseño sísmico de edificio*. Limusa, México, 2004.
- [3] Aurel A Beles, Mihail D Ifrim, and A García Yagüe. *Elementos de ingeniería sísmica*. Omega, Barcelona, España, 1975.
- [4] Leopoldo Molina and José Manuel Ruiz. *Instalaciones automatizadas en viviendas y edificios: ciclo formativo, grado medio*. McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, España, 1999.
- [5] G Estrada. *Estructuras antisísmicas*. Editorial CECSA, México, 1975.
- [6] Domenico Lombardi and Subhamoy Bhattacharya. Modal analysis of pile-supported structures during seismic liquefaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(1):119–138, 2014.
- [7] Bismarck N Luna, Jonathan P Rivera, and Andrew S Whittaker. Seismic behavior of low-aspect-ratio reinforced concrete shear walls. *ACI Structural Journal*, 112(5):593, 2015.
- [8] Aharon Kameo-Cohén. Estudio de la deriva sísmica y las variables sistémicas importantes que inciden en ella. Master's thesis, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela, 1988.
- [9] Etna Corporation. *Etna User Guide*.
- [10] Edificaciones sismorresistentes, 1756-1:2001, 2001.

Normas para la presentación de artículos

Generales

1. Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias aplicadas a la misma.

1.1. Tipos de trabajos

- a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.
- b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.
- c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.
- d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.
- e Cartas al editor.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor del trabajo está comprometido en forma formal que el trabajo es original e inédito, manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y que su trabajo será arbitrado.

1.2. Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato \LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto y presentar tres copias en físico.

Los trabajos en \LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras deben ser en escalas de grises claros, no color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo y en un archivo aparte llamado Leyenda de Figuras.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”. También deben incluirse las tablas en archivos aparte numerados y es necesario incluir un archivo con las leyendas de las tablas.

Toda tabla y/o figura deben ser numeradas en arábigos (1, 2, ...), citadas y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: “en la Figura 3”, “en la Tabla 2”, por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

Los artículos provenientes del exterior del país serán aceptados a través de correo electrónico.

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada,
2. Introducción
3. Metodología o Desarrollo de la Investigación

4. Análisis y Discusión de Resultados

5. Conclusiones y

6. Referencias Bibliográficas.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) a cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Beale [9], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [9], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en L^AT_EX se usará el estilo de bibliografía “unsrt”.

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.
- Capítulos en un libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajo de grado de materia
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Apellidos nombres, tipo título).
- Título.
- *Nombre de la revista*,
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[9] Beale G.O., Arteaga F.J. y Black W.M. Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(4), 301–312, 1998

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[9] Hill J.M. and Dewynne J.N. *Heat Conduction*. Blackell set. Pub. , London, 1992

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, *título*, volumen, editorial, lugar, número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] Kalla S. L. and Galué L. (1993): Generalized fractional Calculus. Global Publishing Company, USA, 145-178.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas.

2. Notas Finales

Los artículos serán sometidos a arbitraje previa a la publicación. Se podrán entregar separatas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA,
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA,
ESTADO CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA

<http://revista.ing.uc.edu.ve/>
<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Authors Information

General

1. Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will considerer for publication contributions original and unpublished in engineering, in particular the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

1.1. Type of Manuscripts:

- a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.
- b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.
- c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).
- d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.
- e Letter to Editor.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the work author is committed to formal so that the paper is original and unpublished, he shows his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

1.2. Article Style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using L^AT_EX or in Microsoft WORD.

The Word works must employ a fount of family Time, to be stored in compact disk and to present three copies in physical.

The labored in L^AT_EX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in eps.

The figures must be in gray scale, no color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a file apart called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of “bold type”. Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, ...) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: “In Figure 3”, “in Table 2”, for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5cm.

The articles coming from other country are accepted through electronic mail (email). The writing sequence for the articles shall have these steps: Title Page, Introduction, Methodology or Research Development, Analysis and Discussion of Results and Conclusions, and References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).
- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200 words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.
- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Jhonson [9], or simply [9] with no author name.

For \LaTeX work will use bibliography style “unsrt”.

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), full title, journal, volume, number, pages and year of publication. For example:
Beale G. O. Arteaga F. J. and Black W.M., Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions of Industrial Electronics*. 39(4), 301-312, 1992.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

Hill J. M. and Dewynne J. N. *Heat Conduction*. Blackell Set. Pub., London, 1987.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps

and lower case), *title*, volume, publisher, place and year. For example:

Kalla S. L. and Galué L. Generalized fractional, in *Calculus*. Global Publishing Company, USA, 145-178, 1997.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations).

2. Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Offprints can be sent for article with a request from the Author(s). Any charge will be arranged by mutual agreement.

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD
DE CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA,
ESTADO CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA
<http://revista.ing.uc.edu.ve/>
<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Carta de compromiso

Envíe con su trabajo la siguiente carta el Comité Editorial de Revista INGENIERÍA UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud. (s) el manuscrito del trabajo titulado: _____

para que sea sometido a evaluación para la publicación. Manifiesto que este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos, que el autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, que el trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores, publicadas por Revista INGENIERÍA UC y que las referencias son directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial. No se conocen conflictos de intereses y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original junto a la fuente de financiamiento

Firma: _____
El autor para correspondencia

Índices de Revista INGENIERÍA UC

Revista INGENIERÍA UC está indexada en:



Comité editorial

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Valencia, Venezuela

Comité Editorial		Editores Honorarios
Dr Adelmo Ortiz Conde USB, Venezuela	Dra Maura Vázquez de Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela	Dr. Edilberto Guevara Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo
Dr. Ángel Rios Castro Universidad de Castilla La Mancha, España	Dr. Merlin Rosales Universidad del Zulia, Venezuela	Dr. Francisco Arteaga Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonino Caralli Universidad de Carabobo, Venezuela	Dr. Pablo Baricelli Universidad de Carabobo	
Dr. Carlos Martínez Universidad de Carabobo, Venezuela	Dr. Roberto Callarotti IVIC, Venezuela	
Dr. Enrique Barbien University of Houston, USA	Dr. Sergio Mora Universidad de Santiago de Chile, Chile	Asesores a la Editora Jefe:
Dr. Guillermo Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela	Dr. Teodoro Garcia Universidad de Carabobo, Venezuela	Dr. Cristóbal E. Vega G. IMYCA, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo
Dr. Herbertt J. Sira R. CINVESTAV–IPN, México	Dr. José A. Díaz Universidad de Florida, USA	Ing. Jesús Jiménez, MSc., CATS, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo
Dr. johnny Bullon Universidad de los Andes, Venezuela		

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316-6832
Enero – abril 2016, Volumen 23
Número 1

Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología; Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);
Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Contenido general: páginas III y IV.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela