



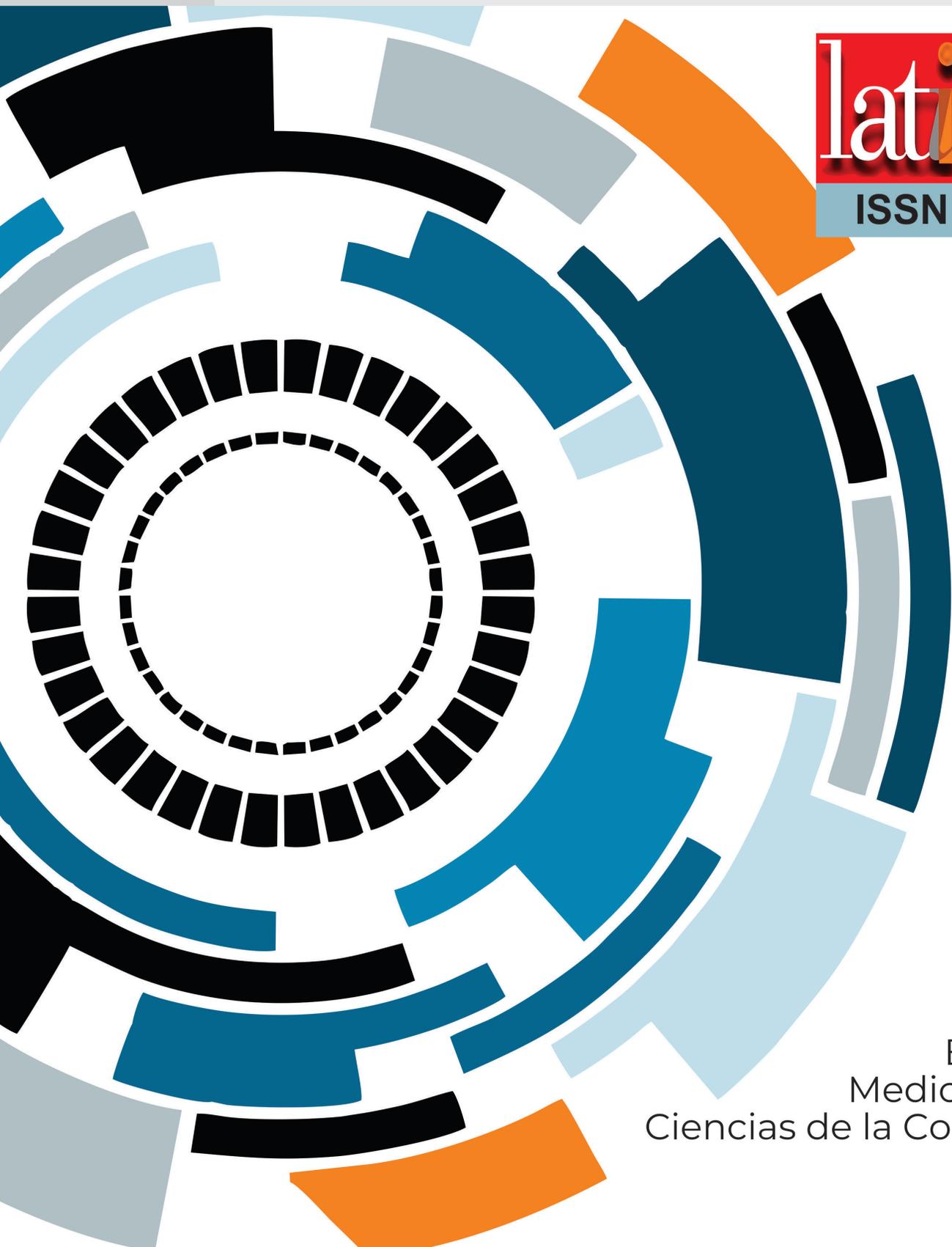
Ingeniantes

Año 5, No. 1, Vol. 1

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

latindex

ISSN 2395-9452



Temáticas
Tierra
Energía
Biológicos
Bioquímica
Medio Ambiente
Ciencias de la Computación

Ingeniantes

Año 5 / No. 1 / Vol. 1

Información Legal

Ingeniantes, año 5, No. 1, Vol 1. mayo 2018 - noviembre 2018, es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Col. Centro, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93821, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: M.I.I Erika Adrienne Bandala Martínez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, M.I.I. Erika Adrienne Bandala Martínez, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Col. Centro, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93821, fecha de última modificación, 08 de junio de 2018.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 25671.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

The logo for LATINDEX features the word "latindex" in a stylized, lowercase serif font. The letters are primarily red, with the letter 'i' being orange. A small orange circle is positioned above the 'i'. The letters 'l', 'a', 't', 'i', 'n', 'd', 'e', 'x' are all in red, while the 'i' is orange. The logo is centered on the page.

Mayo 2018

Directorio

Dr. José Alberto Gaytán García
Director General, ITSM, Veracruz, México

M.S.I. Ana Lilia Sosa y Durán
Subdirectora Académica, ITSM, Veracruz, México

M.A. José Edgar Soto Meneses
Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

M.C. Reyes Pérez y Cano
Director de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Lic. Lidia Herrera Domínguez
Subdirectora de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Ing. Carlos Yossio Nakase Rodríguez
Subdirector del Sistema Abierto, ITSM, Veracruz, México

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
M.I.I. Erika Adrienne Bandala Martínez

Comité de Revisión

Dr. Luis Eduardo Velázquez Contreras, US
Dr. Arturo Pacheco Espejel, UAM
Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT
Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT
Dra. Susana López Cuenca, ITSZ
Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSZ
Dr. Abel García Barrientos, UASLP
Dr. José Jasson Flores Prieto, CENIDET
Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor, CENIDET
Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez, CENIDET
Dr. José Luis Marín Muñiz, Colegio de Veracruz
Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV
Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON
Dr. Marco Tulio Gallo Estrada, UACH
Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM
Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM
Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM
Dr. Luis Mejía Macario, ITSM
Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM
M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI
M.I.A. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM
M.I.A. Luis Enrique García Santamaria, ITSM
M.I. Daniel Aguayo Siqueiros, ITSM
M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM

Diseño Editorial

Lic. Erik Balderas González, ITSM, México
Ing. Sindy Stephany Mota Aguirre ITSM, México

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, ITSM, México

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
<http://www.latindex.org/latindex/ficha?folio=25671>
Correo electrónico: revista.ingeniantes@itsm.edu.mx

Ingeniantes



03



13



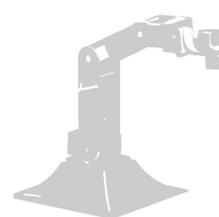
21



29



37



44

Contenido

Análisis de las intervenciones por bombeo mecánico y tubería capilar a producción de hidrocarburos para definir su viabilidad de intervención mediante un diagnóstico FODA _ 03

José Miguel Téllez Zepeda; Ariadna Nayeli García Ramírez; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Renato Alberto Lozano Abascal, Instituto Politécnico Nacional

Análisis comparativo de diseños híbridos y factoriales en el diseño robusto _____ 13

Rigoberto Santillano Villegas; Jaime Sánchez Leal, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

Uso de heurística vinculada a un sistema de información geográfica en el diseño de una red de transporte para el reparto de libros de texto gratuito _____ 21

Ricardo Rivas Corral; Mirella Parada González; Ulises Martínez Contreras, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

Análisis de factores multidimensionales de la calidad del servicio en cafeterías de instituciones educativas utilizando SERVPERF _____ 29

Miguel Ángel Hernández Díaz; Jorge Roberto de Jesús Maravilla Tiburcio; Alicia de Jesús Fernández Maldonado; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Modelo de enfriamiento en el travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de enfriamiento de Newton _____ 37

Adolfo Manuel Morales Tassinari; Raúl Fuentes García; Marcos Manuel Azcaray Rivera, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez

Control de visión inteligente por lógica difusa y RNA para el seguimiento de un objeto aplicado a una estructura robótica de 6 GDL _____ 44

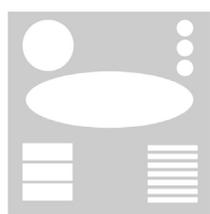
Mariana N. Ibarra-Bonilla; Iván Reyes-Castillo; Fernando Sánchez-Taxis, Instituto Tecnológico Superior de Atlixco; Fernando J. Quiñones-Novelo, INTESC: Electronics & Embedded



53



61



68



75



84

Comparative study of restoration tools by cloning using LSP method _____ 53

José Luis Lira Turriza; Yaqueline Pech Huh; Jose Manuel Lira Turriza; Ariana Abigail Chi-Dzib; Miguel Angel Cohuo Avila, Instituto Tecnológico Superior de Calkini, Campeche

Mapa de bits para compresión de imágenes médicas _____ 61

Miguel Angel Delgado López; Francisco Javier Luis Juan Barragán; Julio César Chávez Novoa, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henriquez Campus Chapala

Circuito elevador de voltaje para una celda solar mediante dispositivos electrónicos para encendido de LED's _____ 68

Jeremías Bravo Tapia, Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio

Diseño de un cilindro neumático de CPVC, con potencial para su uso en exoesqueletos mecánicos de bajo costo _____ 75

Marcos López González; Erick Gómez Hernández; Uzias Edrei Cortes Sánchez; Daniel Márquez Trejo; Luis Alberto Villaseñor Rivera, Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla

Estudio experimental de los efectos de la soldadura en pruebas de crecimiento de grieta en PTR de acero AISI 1020 _____ 84

José Luis Ramírez Cruz, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco; José Emiliano Martínez Ordaz, Universidad Iberoamericana, Santa Fe



Calidad

y

Sistemas de Manufactura

Ingeniantes

Análisis de las intervenciones por bombeo mecánico y tubería capilar a producción de hidrocarburos para definir su viabilidad de intervención mediante un diagnóstico FODA

RESUMEN: El presente artículo demuestra un análisis mediante un estudio FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) de las intervenciones a un pozo de hidrocarburos, particularmente por la intervención por Bombeo Mecánico (BM) e inyección de mejorador de flujo a través de Tubería Capilar (TC). Ambas tecnologías son usadas en la rama petrolera para la optimización de recuperación de hidrocarburos (Gas-Aceite-Agua).

El pozo está bajo la responsabilidad de una empresa paraestatal de hidrocarburos, y se ubica en Veracruz, México.

En él se evaluó las condiciones de producción durante las intervenciones al pozo y con la herramienta FODA se analizó la situación operativa para detectar las ventajas y desventajas de las tecnologías con respecto a los resultados de producción con el objetivo de obtener un panorama de diagnóstico que facilite a la toma de decisiones y la viabilidad de las intervenciones. Con el análisis se observó el comportamiento de la producción de hidrocarburos y el reflejo de los costos por operación de ambos sistemas así como también las mejorías, las pérdidas y las consideraciones operativas del pozo.

PALABRAS CLAVE: Diagnóstico FODA, Bombeo Mecánico, Tubería Capilar, Pozo de aceite.



Colaboración

José Miguel Téllez Zepeda; Ariadna Nayeli García Ramírez; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Renato Alberto Lozano Abascal, Instituto Politécnico Nacional

ABSTRACT: This article demonstrates an analysis through a SWOT study (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) of the interventions to a hydrocarbon well, particularly by the intervention by Mechanical Pumping (BM) and injection of flow improver through Capillary Tubing (TC). Both technologies are used in the oil industry for the optimization of hydrocarbon recovery (Gas-Oil-Water). The well is under the responsibility of a parastatal hydrocarbons company, and is located in Veracruz, Mexico.

In it the conditions of production were evaluated during the interventions to the well and with the SWOT tool the operative situation was analyzed to detect the advantages and disadvantages of the technologies with respect to the production results in order to obtain a diagnosis panorama that facilitates to the decision making and the viability of the interventions.

The analysis showed the behavior of hydrocarbon production and the reflection of the costs of operation of both systems, as well as the improvements, losses and operational considerations of the well.

KEYWORDS: SWOT diagnosis, Mechanical pumping, Capillary Tubing, Hydrocarbon well.

INTRODUCCIÓN

La empresa paraestatal de hidrocarburos de México, cuenta con centros administrativos llamados "Activos Integrales de Producción" estos son los encargados del aprovechamiento de los hidrocarburos de sus respectivas zonas, dentro de su responsabilidad implica lo que es la exploración, perforación, extracción y distribución del producto.

La paraestatal es uno de los mayores productores de hidrocarburo en el mundo, cabe destacar que gran parte de los campos existentes son maduros, es decir que han alcanzado el pico de su producción y comienzan su etapa de declinación, para trabajar los pozos se requiere implementar mecanismos que ayuden a levantar la producción de los mismos, para ello es importante la implementación de los sistemas artificiales. Un sistema artificial de producción (SAP) es aquella fuente externa de energía que se aplica al pozo para incrementar su energía natural.

La empresa cuenta con campos productores de aceite ubicados en la cuenca petrolera de Veracruz.

Actualmente los ingenieros encargados conocen los sistemas artificiales existentes y que cuya eficiencia de los sistemas varía de acuerdo a las condiciones del yacimiento, características del pozo, condiciones de operación, tipo de fluidos, así como la estrategia de explotación y un análisis económico integral. De los sistemas más recurrentes en pozos de aceite son el Bombeo Mecánico (BM) y Tubería Capilar (TC), ambas tecnologías son adquiridas bajo convenio por la empresa paraestatal por medio de contrato y están bajo la responsabilidad de cierta área enfocada en la producción.

Con base a esta información se elige el sistema que más convenga en el pozo candidato y esto permite que la toma de decisiones sea un factor importante a considerar como área de oportunidad.

Investigaciones previas demuestran que la metodología FODA es una herramienta ideal para análisis y ayuda a la toma de decisiones dentro de las organizaciones. La matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) o también conocida con sus siglas en inglés (SWOT, Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) es una herramienta que se utiliza para poder analizar y determinar estrategias para poder solucionar problemas internos y externos [1], el cual tuvo su origen en la época de 1960-1970 por la investigación de Stanford Research Institute [2].

Teniendo como objetivo el diseñar un esquema o tabla en la cual se demuestre los cuatro indicadores de evaluación ya antes mencionados que son las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, en el cual las instituciones deben hacer énfasis a estos cuatro indicadores de evaluación para poder ajustar sus estrategias de acuerdo a la capacidad interna y su ubicación externa. [3]. “Y así el FODA debe tener un orden razonable en el cual nos ayude analizar, determinar y solucionar los problemas internos y externos, mediante la toma de decisiones” [4].

Por otra parte, se realiza el estudio del pozo con el objeto de conocer sus cualidades operativas.

Se recogen datos históricos de producción del pozo y se tiene en consideración los gastos de operación.

Con la información recolectada se elabora la matriz FODA que brinda el apoyo a la toma de decisiones. Finalmente se muestran los resultados, conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

En el área de producción de dicha empresa la toma de decisiones en temas de productividad suele ser complicada, pues se requieren de respuestas de decisión rápida y eficiente.

Principalmente en decidir qué Sistema Artificial de Producción (SAP) es el óptimo a utilizar para el tratamiento a pozos.

En el caso de pozos de aceite, los SAP más recurrentes son el de BM y la inyección de mejorador de flujo a través de TC, ambos sistemas tienen las cualidades de mejorar las condiciones de producción de los pozos.

Además tienen particularidades de operación distinta y el éxito de su resultado depende de la situación operativa en la que se encuentre el pozo, sin omitir que los gastos de operación varían según el uso de su aplicación.

Por lo que el conocer qué sistema es el más adecuado no suele ser una tarea fácil, derivado a esto, se crea la necesidad de usar una herramienta que cumpla con estas necesidades y que satisfaga la toma de decisiones de manera estratégica a futuro.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología a usar es la propuesta de Matriz FODA usada por Mariño, et al, 2008, [5] Dyson, 2004 [6]; David, 1997 [7] y Weihrich, 1982 [8]. Figura 1.

	FORTALEZAS (F) Lista de Fortalezas	DEBILIDADES (D) Lista de debilidades
OPORTUNIDADES (O) Lista de oportunidades	Estrategias F-O Usar las fortalezas para aprovechar las oportunidades.	Estrategias D-O Superar las debilidades aprovechando las oportunidades.
AMENAZAS (A) Lista de amenazas	Estrategias F-A Usar las fortalezas para evitar las amenazas.	Estrategias D-A Reducir las debilidades y evitar las amenazas

Figura 1. Matriz FODA

La matriz conformada por fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas es una herramienta de adaptación fundamental que permite comprender cuatro tipos de estrategias: FO, DO, FA, DA. [9].

Las estrategias FO emplean las fortalezas internas de los sistemas para recurrir a las ventajas de las oportunidades y su aprovechamiento, las estrategias DO procuran sobrepasar internamente las debilidades, utilizando de las oportunidades externas, las estrategias FA usan los elementos para minimizar los impactos de las amenazas que se presentan, y por último las estrategias DA son recursos preventivos que pretenden disminuir las debilidades internas y reparar las amenazas del entorno.

DIAGNÓSTICO

Cualidades del pozo petrolero

El pozo petrolero para caso de estudio, pertenece a la jurisdicción de la empresa paraestatal de hidrocarburos de México.

En el pozo a estudiar Figura 2 se extrae hidrocarburo (Gas-Aceite-Agua) mismo que es transportado a una estación de separación para su posterior tratamiento y punto de venta.

El campo se ubica en el estado de Veracruz, México.



Figura 2. Vista panorámica del pozo petrolero (Fuente: Empresa paraestatal, 2018).

La ingeniería de su diseño Figura 3 muestra que la profundidad de la tubería de producción a fondo de pozo es de 2,852 metros.

También indica que hay presente un ángulo máximo de inclinación de 16.28° a la profundidad de 1,203 metros y que su intervalo de disparo se encuentra a 3,021-3,025 metros de profundidad.

Cabe señalar que este pozo a sido sometidos a intervenciones como los son BM y TC, debido a que por sus condiciones naturales por la explotación, se requiere de sistemas ayuden a extraer el hidrocarburo.

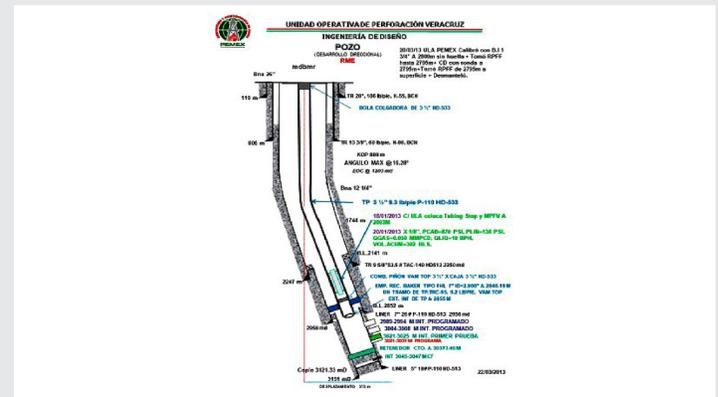


Figura 3. Ingeniería de diseño del pozo petrolero (Fuente: Empresa paraestatal, 2018)

Cualidades operativas de los sistemas Bombeo Mecánico y Tubería Capilar

El objetivo del bombeo mecánico es extraer fluidos mediante un movimiento ascendente-descendente, el cual es dado por la sarta de varillas a la bomba dentro de la tubería de producción.

A continuación, se muestran las condiciones óptimas del equipo en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos de la aplicación del bombeo mecánico (Fuente: Empresa paraestatal, 2018).

	Rango Típico	Rango Máximo
Profundidad	31-3353m	4877m
Volumen	5-1500 BDP	5000 BPD
Temperatura	100°-350°F	550°F
Corrosión	Bueno a Excelente	
Manejo de Gas	Aceptable a bueno	
Manejo de solidos	Aceptable a bueno	

El sistema de bombeo mecánico Figura. 4 consiste de las siguientes partes principales: unidad de bombeo mecánico, mecanismos superficiales, motor principal, unidad de transmisión de potencia o reductor de velocidad, sarta de varillas de succión, bomba subsuperficial y tubería de producción.

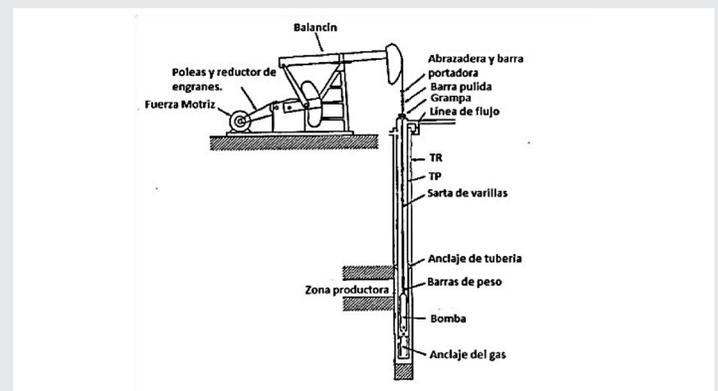


Figura 4. Esquema del sistema de bombeo mecánico. (Fuente: Empresa paraestatal, 2018)

Inyección de Mejorador de Flujo a través de Tubería Capilar

La tubería capilar es una tubería de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " o $\frac{5}{8}$ " de diámetro exterior conformada por la aleación más versátil del mercado desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión, resistencia a la tracción, durabilidad y costo. (Duplex 2205, Incoloy 625 u 825).

La TC facilita la aplicación de diversos productos químicos al pozo a la profundidad deseada, permitiendo maximizar la producción del pozo.

Los productos químicos reaccionan al contacto con los fluidos que se encuentran en el pozo y que ocasionan restricción al flujo de gas. Se genera una reducción en la tensión interfacial del agua.

La TC se introduce al pozo concéntricamente por dentro de la tubería de producción mediante una unidad móvil Figura 5



Figura 5. Instalación de tubería capilar (Fuente: Empresa paraestatal, 2018)

Esta tecnología permite bajar hasta profundidades del orden de 7.000 metros con el pozo en producción y dejar el capilar instalado, vinculándolo en superficie a equipo de inyección de productos químicos. La instalación promedio demora menos de tres horas.

La experiencia recabada hasta el momento indica que el capilar de Duplex 2205 OD $\frac{1}{4}$ " tiene una vida útil promedio superior a las 80 operaciones puntuales (entradas y salidas del pozo).

Mejorador de flujo

Actualmente en la empresa paraestatal de hidrocarburos de México en su proceso de producción usa inyección de productos químicos, los cuales contienen surfactantes que son seleccionados de manera estratégica para dar solución a problemas específicos que se presentan durante el proceso [10].

Un problema específico es la alta viscosidad que presentan los crudos pesados y extra pesados Figura 6 lo que conlleva al uso de mejoradores de flujo.



Figura 6. Crudo pesado sin mejorador de flujo

Los mejoradores de flujo contienen elementos activos cuidadosamente seleccionados que rodean a las partículas del hidrocarburo, mejorando la viscosidad del crudo y su transportación.

Una vez que éste es inyectado mejorará las condiciones en la fluidez del crudo, lo cual comúnmente ocasiona un aligeramiento en la columna del pozo o caídas de presión en las líneas de descarga, siendo aquí donde se deben ajustar las condiciones operativas para un mejor control en la calidad del crudo y la producción. Figura 7.



Figura 7. Crudo pesado con mejorador de flujo

Histórico de Producción

El registro de datos históricos de los trabajos a pozo, mismos que muestran los resultados de producción en gas natural (Qg), aceite (Qo) y agua congénita (Qw) en las figuras 8, 9 y 10 respectivamente en un periodo diagnosticado del 2015 a 2018, lo cual es el tiempo en el que se reporta por la empresa en el que el sistema por BM y TC fue sometido el pozo.

Cabe destacar que la instalación de tubería capilar se realizó el día 07 de julio 2015, a 2,800 metros de profundidad a fondo de pozo y con el equipo de inyección operando para suministrar 360 lts/día del producto mejorador de flujo, siendo hasta el día 03 de febrero del 2017 la suspensión de inyección, el retiro de TC y el retiro del equipo de inyección.

Posteriormente para el día 17 de marzo del 2017, se instala equipo de BM, mismo que hasta el 28 de febrero del 2018 se mantiene operando.

Los resultados de aportación de gas natural del pozo (Fig.8), se muestra una caída en la extracción del gas el día 03/junio/2015 derivado a que se cierra el pozo por presentar alto contenido de agua. Y es aquí cuando se decide una intervención por TC mostrando enseguida que el pozo mantiene una extracción de gas constante y a días posteriores de su instalación se presenta un incremento en la extracción de gas. Además esta aportación se mantiene constante hasta el día del retiro de TC.

Después del retiro de TC y después que se instala el equipo de BM, se muestra un incremento considerable y mantiene una extracción constante durante el periodo en el que se encuentra operando el equipo. También se observa que en el periodo del 11 al 26 de octubre de 2017. Se realiza una intervención por reparación menor (Limpieza de tubería de producción) a pozo cerrado.

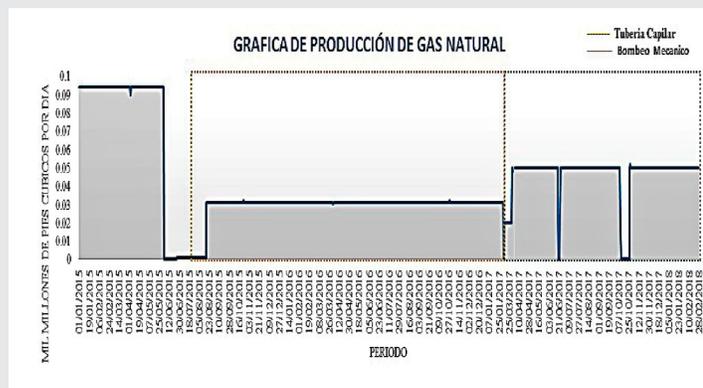


Figura 8. Gráfica de producción de gas del pozo (Elaboración propia)

En el tema de crudo, Figura 9, se aprecia que antes del cierre de pozo por alto % de agua, existe una tendencia con incrementos en la extracción del aceite. Posterior al cierre y en el que se instala la TC.

Existen periodos en los que la producción presenta caídas y crecimientos, siendo a partir de mayo del 2016 la fecha que se presenta el mayor rendimiento y a partir de septiembre del 2016, una clara declinación de la producción al punto del retiro de TC.

Posterior a la instalación del sistema de BM se aprecia que la extracción de aceite difícilmente regresa a sus condiciones anteriores, la producción se muestra más estable.

También se logra apreciar que después de la intervención por reparación menor, el pozo ligeramente regresa a sus condiciones anteriores

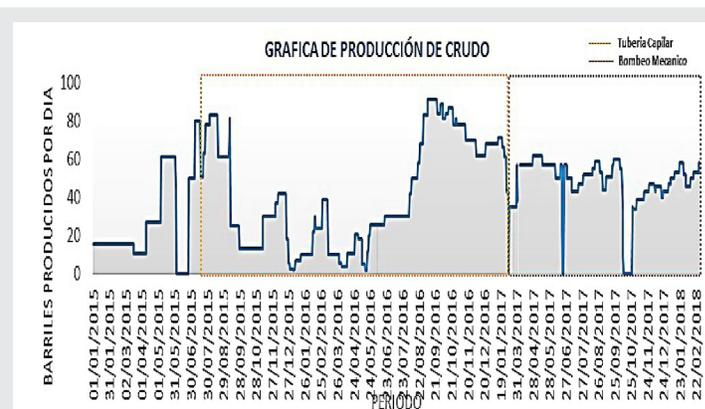


Figura 9. Gráfica de producción del pozo (Elaboración propia).

Para el caso de extracción de agua Figura 10, se muestra en inicio del periodo del diagnóstico la presencia alta de aportación de agua, siendo mayor la producción de esta que la del crudo. Motivo que lleva al pozo a su cierre. Posteriormente en el periodo en el que estuvo operando la TC, la presencia de agua disminuye notablemente.

Existe crecimiento en el mes de diciembre 2015 mantiene una recuperación constante hasta el mes de octubre del 2016 que presenta nuevamente crecimiento en la extracción de agua.

Después de la instalación del sistema de BM, se observa que la recuperación de agua disminuye nuevamente y esta se mantiene igual de baja hasta el mes de agosto-septiembre 2017.

Posterior a la intervención por reparación menor la recuperación de agua presenta incrementos y manteniendo esa tendencia.

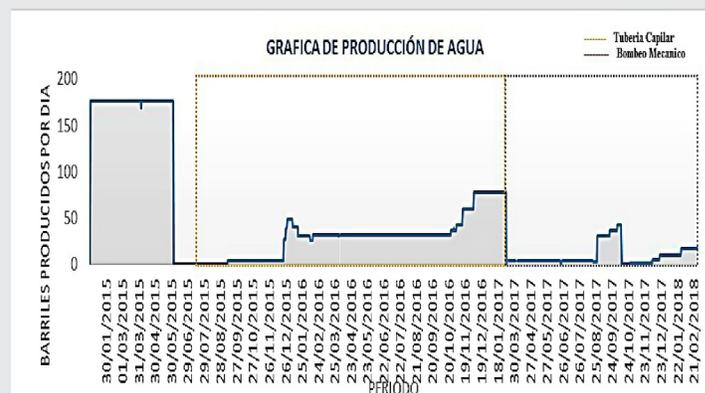


Figura 10. Gráfica de producción de agua del pozo (Elaboración propia)

Resultados de los trabajos
En manera de resumen Tabla 2 y 3 se concentra la producción acumulada en gas, crudo y agua en el periodo que operaran las tecnologías de TC y BM respectivamente.

Tabla 2. Producción acumulada durante el periodo que opera la tubería capilar (Elaboración propia).

TUBERIA CAPILAR			
Días operando	PRODUCCIÓN ACUMULADA		
	Gas (MMPC)	Crudo (BP)	Agua (BP)
577	16.598	24,380	16,784

Tabla 3. Producción acumulada durante el periodo que opera Bombeo Mecánico (Elaboración propia).

TUBERIA CAPILAR			
Días operando	PRODUCCIÓN ACUMULADA		
	Gas (MMPC)	Crudo (BP)	Agua (BP)
577	16.598	24,380	16,784

Consideraciones Financieras

En este apartado, se muestran los gastos por la intervención a pozo, ambas aplicaciones son bajo contrato por lo que los gastos por operación ya están incluidos en el convenio, quedando un precio fijo establecido.

En el caso de la Tecnología TC, se contemplan los factores que intervienen, siendo 5 conceptos (Instalación de TC, Retiro de TC, Suministro de Mejorador de Flujo, Renta del Equipo de Inyección y Mantenimiento Preventivo) mismos que se muestran en la Tabla 4.

El costo por la intervención se establece en el precio unitario por Moneda Nacional (M.N.) y Dólar (U.S.D.) y se multiplica por el volumen acumulado en el periodo que opero el sistema y se ve reflejado en el importe acumulado.

Tabla 4. Análisis de costos por el servicio de TC y suministro de Mejorador de Flujo (Elaboración propia).

INYECCIÓN DE MEJORADOR DE FLUJO A TRAVEZ DE TUBERIA CAPILAR						
CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO		VOLUMEN ACUMULADO	IMPORTE ACUMULADO	
		M.N.	U.S.D.		M.N.	U.S.D.
SUMINISTRO DE TC	METRO	\$ 15.68	\$4.63	2820	\$ 44,217.60	\$ 13,056.60
MANTENIMIENTO PREVENTIVO	SERVICIO	\$ 9,355.39	\$250.40	1	\$ 9,355.39	\$ 250.40
RETIRO DE TC	SERVICIO	\$ 6,844.43	-	1	\$ 6,844.43	-
EQUIPO SUPERFICIAL DE INYECCION	EQUIPO/ DIA	\$ 141.57	-	577	\$ 81,685.89	-
MEJORADOR DE FLUJO	LITRO	\$ 0.48	\$ 2.94	75168	\$ 36,080.64	\$220,993.92
				TOTAL	\$178,183.95	\$234,300.92

Dando como resultado un total de \$178,183.95 M.N. mas \$234,300.92 U.S.D

Para el tema de gastos por el servicio de intervención a pozo con Bombeo Mecánico queda establecido en renta Equipo/día y se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de costos por el servicio de TC y suministro de Mejorador de Flujo (Elaboración propia)

BOMBEO MECANICO				
CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO		IMPORTE ACUMULADO
		U.S.D.	U.S.D.	
OPERACIÓN CON BOMBEO MECANICO	EQUIPO/ DIA	\$ 568.00		\$ 189,144.00

Dando como resultado un gasto total \$189,144.00 U.S.D.

RESULTADOS

Construcción FODA

Se toman en consideración los factores relevantes de operación como lo son la tecnología, aportaciones e impacto a la producción y los costos de operación, de igual manera subdividida en gas, crudo y agua.

El análisis FODA por la operación con TC se observa en la Figura 11 mostrando los resultados de estrategias: FO, DO, FA, DA en los recuadros centrales.

Figura 11. Análisis FODA por la operación con Tubería Capilar a pozo (Elaboración Propia)

ANALISIS FODA DE LA OPERACIÓN CON TUBERIA CAPILAR	FORTALEZA (F)						DEBILIDADES (D)						
	LOGISTICA / TECNOLOGIA			IMPACTO EN LA PRODUCCION			LOGISTICA / TECNOLOGIA			COSTOS DE OPERACIÓN			
	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA	
	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	
OPORTUNIDADES (O)	GAS	ESTRATEGIAS F-O Usar fortalezas para aprovechar las oportunidades						ESTRATEGIAS D-O Superar las debilidades aprovechando las oportunidades					
	CRUDO	F-O (1)						D-O (1) D-O (2) D-O (3) D-O (4)					
	AGUA	F-O (2)											
	GAS	F-O (3)											
	CRUDO	F-O (4)											
	AGUA	F-O (5)											
AMENAZAS (A)	GAS	ESTRATEGIAS F-A Usar las fortalezas para evitar las amenazas.						ESTRATEGIAS D-A Reducir las debilidades y evitar las amenazas.					
	CRUDO	F-A (1)						F-A (1) F-A (2) F-A (3)					
	AGUA	F-A (2)											
	GAS	F-A (3)											
	CRUDO												
	AGUA												

Figura 11. Análisis FODA por la operación con Tubería Capilar del pozo Perdiz 511 (Elaboración Propia)

Tabla 6. Lista de fortalezas (Elaboración propia).

FORTALEZAS	
F-1	Apta para pozos que presentan ángulo de curvatura y con capacidad para el aligeramiento de columna hidrostática.
F-2	Tratamiento del aceite desde fondo de pozo con productos químicos.
F-3	No se presentan fortalezas para disminuir la invasión de agua.
F-4	Ideal para tratar los hidratos de gas
F-5	Material apto para soportar altas temperaturas y evitar corrosión
F-6	No se presentan fortalezas para disminuir la invasión de agua

Tabla 7. Lista de oportunidades (Elaboración propia).

OPORTUNIDADES	
O-1	La tecnología de TC permite un incremento en la producción y la mantiene constante.
O-2	Se disminuye la viscosidad del aceite y en el tiempo presenta incrementos y decrementos de la producción.
O-3	No se presentan oportunidades para disminuir la invasión de agua.
O-4	Aportación promedio = producción acumulada/días operando: $16.598 / 577 = 0.028$ MMPCD
O-5	Aportación promedio = producción acumulada/días operando: $24,380 / 577 = 42.25$ BPD
O-6	Aportación promedio = producción acumulada/días Operando: $16,789 / 577 = 29.08$ BPD

Tabla 8. Lista de debilidades (Elaboración propia).

DEBILIDADES	
D-1	No se presentan debilidades de la tecnología de TC para la recuperación de gas.
D-2	La TC no apta cuando la cantidad de agua es mayor a la del aceite.
D-3	La TC no es apta para pozos con trabajos simultáneos
D-4	La fuente de energía para el suministro de productos químico, es el gas propio del pozo.
D-5	La tecnología TC no es apta para pozos que presenten condensados de gas, alta salinidad y areniscas.
D-6	Aumenta la aportación de agua y aumento en la columna hidrostática.

Tabla 9. Lista de amenazas (Elaboración propia).

AMENAZAS	
A-1	No se presentan debilidades de la tecnología de TC para la recuperación de Gas.
A-2	La tecnología TC puede quedar atorada en pozos con crudo demasiado pesado.
A-3	El Mejorador de Flujo al ser de base agua, aumenta la producción de agua y puede presentar carga de líquidos en la TP.
A-4	Costo promedio = Importe Acumulado/Días Operando: \$178,183.95 / 577 = \$308.81 M.N. por día \$234,300.92 / 577 = \$406.07 U.S.D por día

Tabla 10. Estrategia F-O (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS F-O	
F-O (1)	Es una solución a pozos maduros de hidrocarburo para alargar su vida operativa.
F-O (2)	Su aplicación minimiza riesgos de daño a pozo y evita entrustamiento en la TC.
F-O (3)	Amortización rápida de la inversión inicial.
F-O (4)	La operación promedio insume entre 3 y 5 horas.
F-O (5)	El daño a la TC es mínimo y le confieren al mismo una vida útil de 5 años o soporte hasta 80 operaciones.
F-O (6)	Soporta altas temperaturas, la corrosión, y por su flexibilidad se llega a fondo de pozo.
F-O (7)	Requiere sólo un equipo y dos operadores calificados.

Tabla 11. Estrategia D-O (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS D-O	
D-O (1)	Cuando se presenten abundancias de líquidos, realizar trabajos simultáneos que ayuden a minimizar la columna hidrostática.
D-O (2)	Para evitar el uso de gas natural para alimentar los equipos, se puede usar celdas fotovoltaicas y aprovechar la energía del sol.
D-O (3)	Pozos que presentan alta salinidad y presencia de areniscas, se puede usar otros productos para atacar este problema en conjunto con el mejorador de flujo.
D-O (4)	Suspender inyección cuando se presente carga en la columna hidrostática.

Tabla 12. Estrategia F-A (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS F-A	
F-A (1)	Cuando se presenten pozos con crudo súper pesado, Realizar la bajada de TC con desincrustante para llegar a fondo de pozo. Después comenzar la aplicación de mejorador de flujo.
F-A (2)	Trabajos simultáneos para minimizar la columna hidrostática. (Trabajo con estranguladores).
F-A (3)	La alta concentración de producto químico, presenta cargos altos en cuestión financiera, por lo que la aplicación con la concentración mínima y suspensión de inyección puede ser una opción para minimizar los costos.

Tabla 13. Estrategia D-A (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS D-A	
D-A (1)	Combinar la tecnología TC con otros trabajos a fin de reducir la carga de líquidos (Trabajo con estranguladores).
D-A (2)	En pozos con crudo súper pesado. Iniciar con alta concentración de producto para llegar a fondo, disminuir la viscosidad, posteriormente ir disminuyendo la dosificación para evitar altos costos de operación.
D-A (3)	Pozos que presentan alta salinidad y presencia de areniscas proponer otra tipo de intervención u otra aplicación de productos.

Los valores del análisis FODA Tablas: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se interpretan en los recuadros siguientes:

ANALISIS FODA DE LA OPERACIÓN CON BOMBEO MECANICO	FORTALEZA (F)						DEBILIDADES (D)																
	LOGISTICA / TECNOLOGIA			IMPACTO EN LA PRODUCCION			LOGISTICA / TECNOLOGIA			COSTOS DE OPERACION													
	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA	GAS	CRUDO	AGUA											
												F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6
OPORTUNIDADES (O)	LOGISTICA / TECNOLOGIA	APORTACIONES DE PRODUCCION	GAS	O-1	ESTRATEGIAS F-O Usar Fortalezas para aprovechar las oportunidades						ESTRATEGIAS D-O Superar las debilidades aprovechando las oportunidades												
			CRUDO	O-2	F-O (1)						D-O (1) D-O (2) D-O (3)												
			AGUA	O-3	F-O (2)																		
			GAS	O-4	F-O (3)																		
			CRUDO	O-5	F-O (4)																		
			AGUA	O-6	F-O (5)																		
AMENAZAS (A)	LOGISTICA / TECNOLOGIA	COSTOS DE OPERACION	GAS	A-1	ESTRATEGIAS F-A Usar las fortalezas para evitar las amenazas.						ESTRATEGIAS D-A Reducir las debilidades y evitar las amenazas.												
			CRUDO	A-2	F-A (1)						F-A (1) F-A (2) F-A (3)												
			AGUA	A-3	F-A (2)																		
			GAS	A-4	F-A (3)																		
			CRUDO	A-4	F-A (4)																		
			AGUA	A-4	F-A (4)																		

Figura 12. Análisis FODA por la operación con Bombeo Mecánico del pozo Perdiz 511 (Elaboración Propia)

Tabla 14. Lista de fortalezas (Elaboración propia).

FORTALEZAS	
F-1	Resultados desde el comienzo de la intervención.
F-2	Adaptable en pozos con problemas de corrosión e incrustaciones.
F-3	Efectivo para el tratamiento de invasión de agua.
F-4	Genero incrementos en la producción en comparación con la tecnología TC
F-5	Ideal para el tratamiento del aceite incrustaciones del pozo.
F-6	Ideal para disminuir la carga Hidrostática.

Tabla 15. Lista de Oportunidades (Elaboración propia).

OPORTUNIDADES	
O-1	Incrementa la producción de gas y mantiene constante su aportación.
O-2	Incrementa la producción de aceite considerablemente.
O-3	Reduce favorablemente la carga hidrostática.
O-4	Aportación promedio = producción acumulada/días operando: 16.041 / 333 = 0.048 MMPCD
O-5	Aportación promedio = producción acumulada/días operando: 16,579/ 333 = 49.78 BPD
O-6	Aportación promedio = producción acumulada/días operando: 3,149/ 333 = 9.45 BPD

Tabla 16. Lista de Debilidades (Elaboración propia).

DEBILIDADES	
D-1	No apto a pozos muy profundos.
D-2	No apto para trabajos simultáneos (Ecómetros, embolo viajero, RPTFP)
D-3	No presenta debilidades con pozos con carga de líquidos.
D-4	La fuente de energía demanda combustible para hacer funcionar los motores.
D-5	No apto a pozos con baja producción. Pues el costo sobrepasa a lo que se produce.
D-6	No presenta debilidades, pues la columna de líquidos disminuye favorablemente.

Tabla 17. Lista de Amenazas (Elaboración propia).

AMENAZAS	
A-1	No apto para pozos con demasiada carga de gas.
A-2	La tecnología BM no es apta para pozos demasiado desviados.
A-3	No se presentan amenazas en el pozo por la presencia de líquidos.
A-4	Costo promedio = importe acumulado/días operando: 189,144.00 / 333 = \$568.00 U.S.D por día

Tabla 18. Estrategias F-O (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS F-O	
F-O (1)	Es una solución a pozos con incrustaciones.
F-O (2)	La recuperación del aceite crece considerablemente.
F-O (3)	Amortización rápida de la inversión inicial.
F-O (4)	El diseño es simple y la operación requiere poca atención de operadores.
F-O (5)	Favorece a la eliminación de agua por carga hidrostática.
F-O (6)	Soporta altas temperaturas y a la corrosión.
F-O (7)	Aumenta la recuperación de gas.

Tabla 19. Estrategias D-O (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS D-O	
D-O (1)	Aprovechar trabajar el pozo con ajustes de estranguladores.
D-O (2)	El crecimiento de la producción favorece al impacto económico del pozo.
D-O (3)	Pozos que presentan alta salinidad y presencia de areniscas pueden ser atacados con el sistema de Bombeo Mecánico.

Tabla 20. Estrategias F-A (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS F-A	
F-A (1)	Ayuda al pozo para evitar taponamientos.
F-A (2)	Se pueden realizar trabajos simultáneos para minimizar la columna hidrostática. (Trabajo con estranguladores).
F-A (3)	Al aumentar la producción se ve reflejado el costo beneficio por la intervención a pozo.
F-A (4)	Se pueden atacar pozos que presenten carga de líquidos que estén por encima del ángulo de desviación de la tubería de producción

Tabla 21. Estrategias D-A (Elaboración propia).

ESTRATEGIAS D-A	
D-A (1)	Combinar la tecnología BM con otros trabajos (Trabajo con estranguladores).
D-A (2)	Descartar su aplicación a pozos bastante profundos (Mayores a los 2,400 mts de profundidad).
D-A (3)	Usar el gas natural del pozo para alimentar la fuente de energía del sistema de BM.

CONCLUSIONES

El diagnóstico con la herramienta FODA, permite aclarar la situación del pozo después de ser intervenido por los sistemas de BM y TC.

Con las estrategias FO, DO, FA, DA. Se permitió tener un mejor panorama de las operaciones y facilita a la toma de decisiones.

En el análisis de la producción se observa que la producción de gas y crudo aumento en menor tiempo con el sistema de BM en comparación con el sistema de TC.

La invasión de agua en los pozos es un problema que se presenta en la rama petrolera, con este análisis se observa que con el sistema de BM disminuye esta problemática en comparación con el sistema de TC.

El análisis demostró que en el pozo el costo al día por BM es \$568.00 U.S.D. y el costo promedio al día por Tubería Capilar es de \$406.07 U.S.D. más \$308.81 M.N.

Se determina que el gasto por operación por BM es menor en un 22.38% aprox. En comparación con los gastos por TC.

La aportación promedio de gas al día con BM es 0.048 MMPCD, mientras que la aportación promedio al día por TC es de 0.029 MMPCD.

La aportación promedio de crudo al día con BM es 49.79 BPD, mientras que la aportación promedio al día por TC es de 42.25 BPD.

La aportación promedio de agua al día con BM es 9.46 BPD, mientras que la aportación promedio al día por TC es de 29.09 BPD.

Se recomienda continuar con el sistema de BM pues es de menor inversión y con mejores resultados de explotación de hidrocarburos.

Se recomienda aplicar el mismo método de diagnóstico a los pozos restantes incluso si no cuentan con la aplicación de los sistemas de BM y TC.

Con los resultados obtenidos del diagnóstico FODA al pozo de hidrocarburos descrito, se define que el sistema de BM es más viable en comparación con la TC.

BIBLIOGRAFÍA

[1] G. A. O. Gallardo, «Análisis DOFA al quehacer ecuménico en Colombia: una aproximación en perspectiva teológica y estratégica,» Universidad

Santo Tomás, Facultad de Teología, pp. 313-346, 2014.

[2] D. Otero y F. L. Gache, «EVOLUCIONES DINÁMICAS EN EL DIAGRAMA FODA,» *Revista Científica "Visión de Futuro"*, 2006.

[3] A. L. Moral, J. M. G. Arrabal y I. L. González, «Nuevas experiencias de evaluación estratégica en los centros educativos. La aplicación de una matriz DAFO en el centro de educación infantil y primaria "mediterráneo" de Córdoba.,» *Estudios sobre educación*, p. https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/9825/2/ESE_18_8.pdf, 2010.

[4] A. Chapman, «Análisis DOFA y análisis PEST,» 2004. [En línea]. Available: <http://empresascreciendobien.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/Manual-DOFA.pdf>.

[5] A. I. Mariño, F. A. A. Cortés y G. L. A. Ruiz, «Herramienta de software para la enseñanza y entrenamiento en la construcción de la matriz DOFA,» *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, pp. 159-164, 2008.

[6] R. G. Dyson, «Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick,» *European Journal of Operational Research*, vol. 152, pp. 631-640, 2004.

[7] D. Fred, *Conceptos de administración estratégica*, México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.

[8] H. Weihrich, «The TOWS matrix—A tool for situational analysis,» *Long Range Planning*, vol. 15, pp. 54-66, 1982.

[9] A. M. Foschiati y J. A. Alberto, «Análisis e impacto de la expansión urbana sobre,» *Párrafos Geográficos*, vol. 11, nº 1, pp. 26-63, 2012.

[10] E. M. Arriola y C. S. De Gorordo, «Optimización de la producción en Pozos con Crudo Pesado y Extra Pesado Utilizando Mejoradores de Flujo,» *PetroQuiMex*, pp. 26-32, 2016.



Calidad

y

Sistemas de
Manufactura

Ingeniantes

Análisis comparativo de diseños híbridos y factoriales en el diseño robusto



Colaboración

Rigoberto Santillano Villegas; Jaime Sánchez Leal, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

RESUMEN: El presente artículo describe la investigación realizada en el campo del diseño de experimentos y robusto, esta se centra en dos tipos de ellos utilizados en los procesos de optimización y para reducir la variación de productos y procesos, específicamente la investigación consiste en evaluar el desempeño del diseño híbrido para tres variables tomando como base o punto de referencia el central compuesto. La evaluación se hace por medio de la simulación y del uso de funciones de prueba para posteriormente utilizar el análisis estadístico para determinar comportamiento y diferencias. Por otra parte, también se hace un análisis con respecto a las funciones de evaluación de experimentos: C_{pk}, Respuesta Dual y Razon señal-ruido para determinar cuál de estas es la que más se adecua al uso de los diseños híbridos, el análisis se realiza por medio de la comparación de las dos primeras con la razón señal-ruido.

PALABRAS CLAVE: Diseño Robusto, Diseño de Experimentos, Razon Señal-Ruido, Índices de Capacidad del Proceso, Mejora del Proceso.

ABSTRACT: The present article describes the investigation realized in the field of the experiment and robust design, this is focused on two types of them used in the optimization process and for reducing variation in products and processes, specifically the investigation consists in evaluating the performance of the hybrid design for three variables having in consideration as a base or starting point the central compound. The evaluation is done by simulation and the use of test functions so afterwards the statistical analysis can be used to determine the behavior and the differences. On the other hand, an analysis is done with relation to the evaluation functions of experiments: C_{pk}, dual answer and signal to noise ratio to determine which one of them is the most adequate in the use of hybrid designs, the analysis is made by comparison between the first two and signal to noise ratio.

KEYWORDS: Robust designs, Design of experiments, Signal to noise ratio, Process capacity index, Process improvement.

INTRODUCCIÓN

Una de las tareas más importantes en el diseño de productos y procesos es minimizar los efectos de las variaciones en las tolerancias y especificaciones requeridas, cuya fuente proviene de parámetros sobre los cuales no se tiene control y pueden causar cambios no deseados en el desempeño de un producto [1]. Cumplir con esto no siempre es posible debido a una gran diversidad de factores, entre los más comunes están: fallas en el diseño de la maquinaria, materiales de mala calidad, errores inducidos por el personal, el método que se utilice, factores ex-

ternos que no son posibles de controlar, entre otros. Todo esto genera que la variabilidad sea demasiado grande para los criterios de aceptación. Las alternativas a las que se recurre para solucionar el problema son, por lo general, elevadas en costo, como lo son: hacer una inversión de capital en equipo, maquinaria, personal, instalaciones. Dado que estas alternativas pueden funcionar solo como una medida correctiva, lo ideal sería reformular la composición del estado inicial del producto de manera que este no se viera alterado por causas de fuentes externas y así se evitaría dispersiones o variabilidad alrededor de un objetivo [2], en otras palabras, diseñar un producto robusto.

Se entiende por robusto a que el desempeño del producto o proceso se encuentra consistentemente dentro de especificaciones y es relativamente insensible a aquellos factores que son difíciles de controlar [3]. El profesor Genichi Taguchi (2005) [4] uso el término diseño robusto de parámetros (RPD) por sus siglas en inglés "Robust Parameter Design", para describir esta importante clase de problemas. Esencialmente, la metodología del RPD se esfuerza en reducir la variación de productos y procesos por medio de una adecuada elección de los factores controlables (o parámetros) que hacen a un sistema insensible (robusto) a los cambios en un conjunto de factores incontrolables que representan la mayoría de las fuentes de variación. Una vez establecidos los factores de influencia en un proceso, el siguiente paso es buscar los ajustes apropiados para los factores de control que optimizan la salida de un proceso y la calidad de un producto [5].

La selección apropiada del diseño de experimentos es un aspecto realmente importante en los problemas de RPD. En su mayoría esta selección se hace en base a los requerimientos o restricciones específicas de cada problema, en este caso, se aborda el tema de diseño robusto mediante el uso de arreglos híbridos que permiten contrastar las aplicaciones, ventajas y desventajas del central compuesto. El soporte es el uso de la simulación de eventos reales, con ayuda del software Minitab 17 [6] el cual permite diseñar y analizar de una manera genérica los comportamientos de los arreglos híbridos en el diseño robusto.

Los objetivos de este trabajo son evaluar la eficacia y la factibilidad de los diseños híbridos haciendo una comparación con respecto al central compuesto, así mismo, determinar cuál función de respuesta (Respuesta Dual y Cpkm) es la mejor alternativa para tratar con ellos en base a la comparación con la razón señal ruido.

Los diseños híbridos pertenecen a los de segundo orden y se desarrollan en base al uso del central

compuesto. La mayor utilidad de estos se enfoca en resolver problemas con 3, 4, 6 y 7 variables, los niveles de cada una de ellas son creados de manera que se obtenga cierta simetría en el diseño.

MATERIAL Y MÉTODOS

Inicialmente se seleccionan las funciones de prueba (modelos de simulación) a utilizar en el proceso de simulación, así como también las variables y características propias de cada uno de ellos, las cuales son mostradas en la Tabla 1, la forma original de los modelos se modifica para fines de controlar la región de experimentación.

Tabla 1. Características de los modelos.

Modelo Esférico
$Y_0 = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2) + \frac{81}{8} + \varepsilon$
<p style="text-align: center;">Donde</p> <p>$x_1, x_2, x_3 =$ Factores de Control</p> <p>$r_1, r_2, r_3 =$ Factores de Ruido</p> <p>0 = Minimo Global (punto óptimo)</p> <p>81/8 = Minimo global modificado</p> <p>$\varepsilon =$ Error aleatorio</p> <p>(0,0,0) = Valor de los factores en el punto óptimo</p>
Modelo Rosenbrock
$Y_0 = \left[100(x_1^2 - x_2)^2 + (x_1 - 1)^2 + 100(x_2^2 - x_3)^2 + (x_2 - 1)^2 + \frac{229}{20} \right] + \left[100(r_1^2 - r_2)^2 + (r_1 - 1)^2 + 100(r_2^2 - r_3)^2 + (r_2 - 1)^2 + \frac{229}{20} \right] + \varepsilon$
<p style="text-align: center;">Donde</p> <p>$x_1, x_2, x_3 =$ Factores de Control</p> <p>$r_1, r_2, r_3 =$ Factores de Ruido</p> <p>0 = Minimo Global (punto óptimo)</p> <p>22.9 = Minimo global modificado</p> <p>$\varepsilon =$ Error aleatorio</p> <p>(1,1,1) = Valor de los factores en el punto óptimo</p>
Modelo Zakharov
$Y_0 = \left[(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + (0.5(1x_1 + 2x_2 + 3x_3))^2 + (0.5(1x_1 + 2x_2 + 3x_3))^4) + \frac{851}{50} \right] + [r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + (0.5(1r_1 + 2r_2 + 3r_3))^2 + (0.5(1r_1 + 2r_2 + 3r_3))^4] + \varepsilon$
<p style="text-align: center;">Donde</p> <p>$x_1, x_2, x_3 =$ Factores de Control</p> <p>$r_1, r_2, r_3 =$ Factores de Ruido</p> <p>0 = Minimo Global (punto óptimo)</p> <p>17.02 = Minimo global modificado</p> <p>$\varepsilon =$ Error aleatorio</p> <p>(0,0,0) = Valor de los factores en el punto óptimo</p>

Una vez que se establecen los modelos de prueba y sus características se crea la matriz producto para evaluar los diseños, esta se conforma por una matriz interna que representa los factores de control y una matriz externa que representa los factores ruido. Los diseños híbrido y central compuesto toman el lugar de la matriz interna y un diseño factorial toma el lugar de la matriz externa. En un primer experimento la matriz producto se estructura por el central compuesto con una réplica y el factorial general con tres replicas, los datos de todas las combinaciones posible de los niveles de los factores se obtienen mediante una hoja de cálculo en Excel [7], remplazando el modelo (Esférico, Rosenbrock o Zakharov) en cada una de las celdas que contienen las combinaciones. En los experimentos subsiguientes se remplaza el central compuesto por el híbrido y se prueba con cada uno de los modelos de simulación teniendo un total de seis experimentos diferentes. Adicionalmente se evalúan 4 diferentes puntos más para analizar los efectos de una función no centrada en el punto óptimo con lo cual se obtienen un total de 30 experimentos diferentes. La Tabla 2 muestra el primero de los experimentos, se muestra solo una réplica del diseño factorial general.

Tabla 2. Matriz producto para el diseño central compuesto-Punto Óptimo (Modelo Esférico).

			Diseño Factorial General								
			Z1	-3	-3.000	-3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	
			Z2	-3.000	-3.000	3.000	3.000	-3.000	-3.000	3.000	3.000
			Z3	-3.000	3.000	-3.000	3.000	-3.000	3.000	-3.000	3.000
Diseño Central Compuesto	X1	X2	X3								
	-3.000	-3.000	-3.000								
	3.000	-3.000	-3.000								
	-3.000	3.000	-3.000								
	3.000	3.000	-3.000								
	-3.000	-3.000	3.000								
	3.000	-3.000	3.000								
	-3.000	3.000	3.000								
	3.000	3.000	3.000								
	-5.045	0.000	0.000								
	5.045	0.000	0.000								
	0.000	-5.045	0.000								
	0.000	5.045	0.000								
	0.000	0.000	-5.045								
	0.000	0.000	5.045								
	0.000	0.000	0.000								
0.000	0.000	0.000									
0.000	0.000	0.000									
0.000	0.000	0.000									
0.000	0.000	0.000									
0.000	0.000	0.000									

Después de que se dispone de todos los datos correspondientes a cada uno de los modelos y diseños se procede a calcular los valores de las funciones para medir la respuesta (Cpkm, Respuesta Dual y SNR), con la finalidad de realizar una optimización de estos y determinar cuál es el arreglo de valores para cada una de las variables que proporciona mejores resultados, es decir, valores más cercanos al óptimo de la función utilizada. La Tabla 3 muestra los resultados para el modelo esférico con el diseño central compuesto evaluado en el punto óptimo.

Tabla 3. Funciones de respuesta para el Modelo Esférico con el Diseño Central Compuesto.

X1	X2	X3	Media	CPKM	RD	SNR
-3.000	-3.000	-3.000	64.183	0.252	40.035	-36.149
3.000	-3.000	-3.000	64.182	0.252	40.211	-36.148
-3.000	3.000	-3.000	64.073	0.253	40.241	-36.134
3.000	3.000	-3.000	64.147	0.252	40.103	-36.144
-3.000	-3.000	3.000	64.098	0.253	40.162	-36.137
3.000	-3.000	3.000	64.027	0.253	40.170	-36.127
-3.000	3.000	3.000	64.139	0.252	40.027	-36.143
3.000	3.000	3.000	64.122	0.252	39.984	-36.140
-5.045	0.000	0.000	62.510	0.270	41.575	-35.919
5.045	0.000	0.000	62.591	0.269	41.439	-35.930
0.000	-5.045	0.000	62.539	0.270	41.653	-35.923
0.000	5.045	0.000	62.605	0.269	41.716	-35.932
0.000	0.000	-5.045	62.490	0.271	41.835	-35.916
0.000	0.000	5.045	62.461	0.271	41.982	-35.912
0.000	0.000	0.000	37.022	0.459	67.155	-31.369
0.000	0.000	0.000	37.036	0.459	67.404	-31.373
0.000	0.000	0.000	37.097	0.458	67.222	-31.387
0.000	0.000	0.000	36.964	0.459	67.329	-31.356
0.000	0.000	0.000	37.147	0.458	66.950	-31.399
0.000	0.000	0.000	37.049	0.459	67.287	-31.376

El siguiente paso es utilizar el optimizador de Minitab [6] para determinar los niveles óptimos de los factores de control tomando como respuesta las funciones anteriormente calculadas en cada modelo. Los niveles óptimos son aquellos que consiguen maximizar los valores de las funciones Cpkm, Respuesta Dual y Razón Señal-Ruido y minimizar los valores de la media, se analizan por separado cada una de ellas, con excepción de la razón señal-ruido que se analiza junto con la media. En la Tabla 4 se muestra un resumen de la optimización de las funciones en el modelo esférico.

Tabla 4. Valores Óptimos (Esférico-Central Compuesto).

Función	Niveles óptimos			Objetivo	Repuesta de la Función
	X1	X2	X3		
Cpkm	0	0	0.0510	Maximizar	0.4588
Respuesta Dual	-	0	0	Maximizar	67.2234
Razón Señal-Ruido	0	0	0.0510	Maximizar	-31.3788
Media	0	0	0.0510	Minimizar	37.0533

RESULTADOS

Una vez realizados todos los experimentos y con la finalidad de mostrar de una manera clara y que permita visualizar y contrastar los resultados obtenidos de cada uno de los experimentos, se presenta la Tabla 5 en la cual se observan todos los modelos y diseños, funciones para medir la respuesta, así como las respuestas observadas de diferentes parámetros. Cada una de estas respuestas es obtenida de manera diferentes y se utilizan con el fin de realizar un análisis de resultados entre los di-

ferentes diseños, modelos, funciones y puntos de evaluación de cada uno de ellos.

- La respuesta observada de la función es aquella generada por Minitab [6] una vez hecha la optimización para las variables de control.
- La respuesta observada del modelo se obtiene al sustituir los valores óptimos de las variables de control en el modelo original utilizado.
- La distancia para cada punto corresponde a aquella entre los valores óptimos de las variables y cada uno de los diferentes puntos evaluados en cada modelo.
- La distancia al óptimo real representa la variación entre los valores óptimos de las variables para cada punto de evaluación y el punto en el cual se obtiene el mínimo global de cada modelo.
- La ganancia se genera a partir de la diferencia entre la respuesta obtenida en el modelo con los valores de los diferentes puntos de evaluación y la respuesta observada del modelo.

Tabla 5. Resultados para los niveles óptimos de cada modelo y diseño.

	Diseño	Función	Repuesta Observada de la Función	Repuesta Observada del Modelo	Distancia para cada punto	Distancia al Óptimo Real	Ganancia
Modelo Esférico	Central Compuesto	CPKM	0.4588	10.1276	0.0510	0.0510	-0.0026
		RD	67.2234	10.1276	0.0510	0.0510	-0.0026
		SNR	-31.3788	10.1276	0.0510	0.0510	-0.0026
		MEDIA	37.0533	10.1276	0.0510	0.0510	-0.0026
	Hibrido	CPKM	0.4661	10.8431	0.8474	0.8474	-0.7181
		RD	67.1887	10.1257	0.0263	0.0263	-0.0007
		SNR	-31.4294	10.2121	0.2952	0.2952	-0.0871
		MEDIA	37.2043	10.2121	0.2952	0.2952	-0.0871
Modelo Rosenbrock	Central Compuesto	CPKM	0.4334	194.0642	2.6081	2.6081	-182.6142
		RD	1720.5884	67.3782	2.2672	2.2672	-55.9282
		SNR	-61.4668	67.5253	2.2970	2.2970	-56.0753
		MEDIA	431.2787	67.5253	2.2970	2.2970	-56.0753
	Hibrido	CPKM	0.5939	202.7238	2.6244	2.6244	-191.2738
		RD	2640.9076	134.8467	2.4902	2.4902	-123.3967
		SNR	-59.6359	42.4239	2.1726	2.1726	-30.9739
		MEDIA	-269.0161	35.9776	2.1251	2.1251	-24.5276
Modelo Zackarov	Central Compuesto	CPKM	0.4267	33085.3453	11.6519	11.6519	-33085.3453
		RD	11660.0000	95.0712	9.6412	9.6412	-95.0712
		SNR	-77.5406	94.5033	9.6642	9.6642	-94.5033
		MEDIA	-1430.0000	94.5033	9.6642	9.6642	-94.5033
	Hibrido	CPKM	0.4137	102621.3626	10.9211	10.9211	-102621.3626
		RD	7175.6031	72.7119	8.5255	8.5255	-72.7119
		SNR	-79.1677	106.2471	10.2403	10.2403	-106.2471
		MEDIA	3364.4844	106.2471	10.2403	10.2403	-106.2471

Partiendo de la información obtenida de los experimentos anteriores, se procede a realizar un análisis sobre las distancias al óptimo real, considerando como factores de interés a los diseños, funciones para medir la respuesta y los puntos de evaluación, lo que se pretende con este tipo de análisis, es determinar cuál de estos factores repercute de manera significativa en la distancia con respecto al óptimo. Para esto, se genera un modelo lineal general

en Minitab [6] con los factores y respuestas antes mencionados. En la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos para el Modelo Esférico.

General Linear Model: Distancia al óptimo real versus Diseño, Función, Punto I

Factor	Type	Levels	Values
Diseño	Fixed	2	Central Compuesto, Hibrido
Función	Fixed	4	CPKM, MEDIA, RD, SNR
Punto I	Fixed	5	1, 2, 3, 4, 5

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diseño	1	0.14792	0.14792	8.19	0.008
Función	3	1.02884	0.34295	18.99	0.000
Punto I	4	0.12630	0.03157	1.75	0.167
Diseño*Función	3	0.06319	0.02106	1.17	0.340
Error	28	0.50558	0.01806		
Total	39	1.87182			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.134374	72.99%	62.38%	44.88%

Figura 1. Modelo lineal general-Modelo Esférico.

En la Figura 1, se puede apreciar que el punto de evaluación y la interacción entre el diseño y la función no son significantes, es decir, las distancias al óptimo real no se ven afectadas por los diferentes puntos de evaluación, en general todos ellos producen el mismo resultado, por otra parte, no existe interacción entre los diseños y las funciones de respuesta. Una vez determinado lo anterior, se elimina del modelo lineal general los factores que no son significantes y con la finalidad de evaluar la relación entre la distancia entre cada punto y la distancias al óptimo real, se introduce esta variable al modelo como una covariable. En lo sucesivo los puntos de evaluación no se consideran en el modelo. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos.

General Linear Model: Distancia al opt versus Distancia para c, Diseño, Función

Factor	Type	Levels	Values
Diseño	Fixed	2	Central Compuesto, Hibrido
Función	Fixed	4	CPKM, MEDIA, RD, SNR

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Distancia para cada punto	1	0.12299	0.12299	7.49	0.010
Diseño	1	0.13085	0.13085	7.97	0.008
Función	3	0.58562	0.19521	11.89	0.000
Diseño*Función	3	0.05318	0.01773	1.08	0.372
Error	31	0.50888	0.01642		
Total	39	1.87182			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.128123	72.81%	65.80%	52.47%

Figura 2. Modelo lineal general ajustado-Modelo Esférico.

Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados para los modelos Rosenbrock y Zakharov.

General Linear Model: Distancia al opt versus Distancia para c, Diseño, Función

Factor	Type	Levels	Values
Diseño	Fixed	2	Central Compuesto, Híbrido
Función	Fixed	4	CPKM, MEDIA, RD, SNR

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Distancia para cada punto	1	4.8419	4.8419	19.55	0.000
Diseño	1	2.6240	2.6240	10.60	0.003
Función	3	4.9148	1.6383	6.62	0.001
Diseño*Función	3	0.5449	0.1816	0.73	0.540
Error	31	7.6772	0.2477		
Lack-of-Fit	30	6.5303	0.2177	0.19	0.971
Pure Error	1	1.1469	1.1469		
Total	39	19.1275			

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.497646	59.86%	49.50%	33.59%	

Figura 3. Modelo Lineal General-Modelo Rosenbrock

General Linear Model: Distancia al opt versus Distancia para c, Diseño, Función

Factor	Type	Levels	Values
Diseño	Fixed	2	Central Compuesto, Híbrido
Función	Fixed	4	CPKM, MEDIA, RD, SNR

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Distancia para cada punto	1	13.1535	13.1535	22.14	0.000
Diseño	1	0.3905	0.3905	0.66	0.424
Función	3	0.0304	0.0101	0.02	0.997
Diseño*Función	3	0.2015	0.0672	0.11	0.952
Error	31	18.4158	0.5941		
Lack-of-Fit	25	14.2399	0.5696	0.82	0.672
Pure Error	6	4.1759	0.6960		
Total	39	42.4769			

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.770751	56.65%	45.46%	29.71%	

Figura 4. Modelo Lineal General- Modelo Zakharov

Otra manera de visualizar los resultados anteriores es por medio de gráficas, mismas que se muestran en las Figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10 en estas se observa el comportamiento de los diseños y las funciones con respecto a la distancia al óptimo real.

La Tabla 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos por cada uno de los modelos, es decir, el diseño y la función que consiguen optimizar la respuesta, entiéndase como óptimo a la mínima distancia observada con respecto al punto óptimo real (inicial u original) de cada modelo.

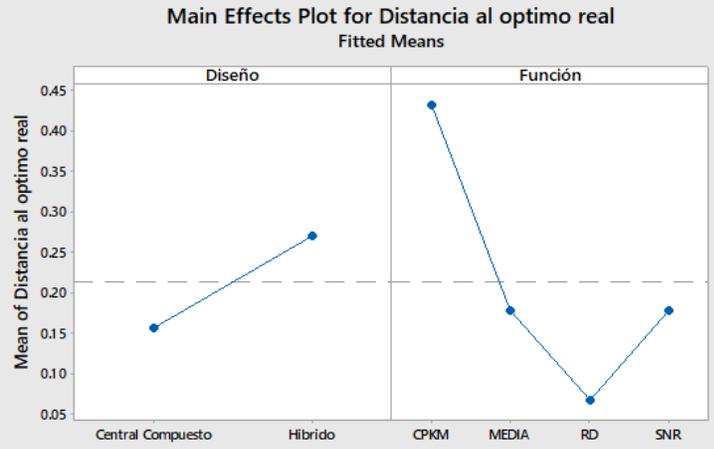


Figura 5. Gráfica de efectos principales- Modelo Esférico

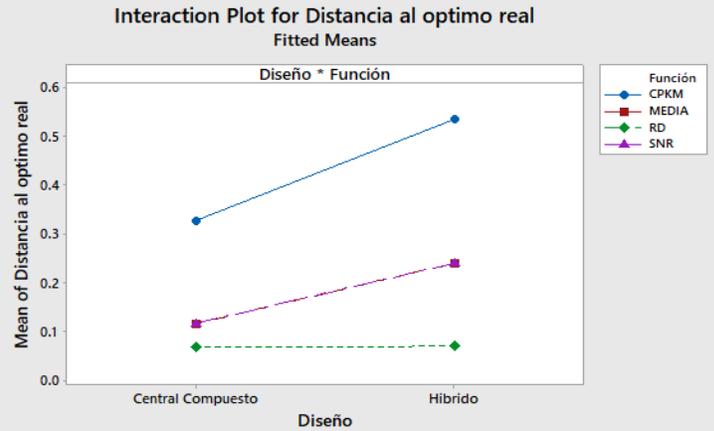


Figura 6. Gráfica de interacción- Modelo Esférico

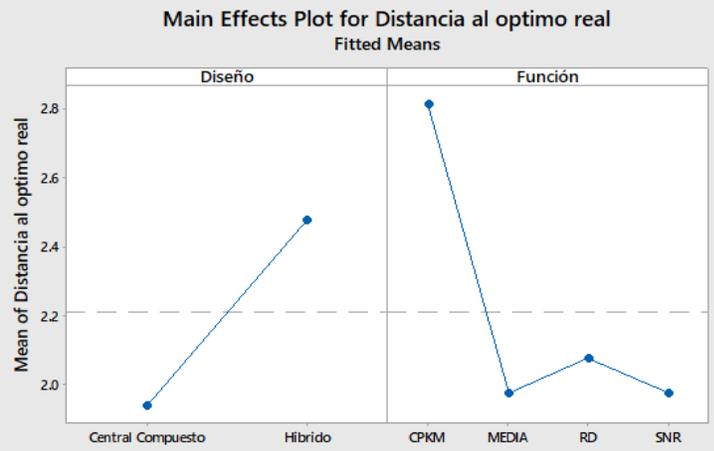


Figura 7. Gráfica de Efectos Principales-Modelo Rosenbrock

Tabla 6. Resultados para las distancias al óptimo.

Modelo	Óptimo	
	Diseño	Función de Respuesta
Esférico	Central Compuesto	RD
Rosenbrock	Central Compuesto	SNR Y MEDIA
Zakharov	Central Compuesto	RD, SNR Y MEDIA

Otra manera de evaluar los resultados es a través de la ganancia, esta permite determinar cuál diseño y función proporciona un mejoramiento, es decir, un incremento en la respuesta observada del modelo. El procedimiento sigue el mismo patrón que anteriormente se estableció, con la única diferencia que en este caso la variable de respuesta del modelo será la ganancia. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados para La ganancia.

Modelo	Óptimo	
	Diseño	Función de Respuesta
Esférico	Central Compuesto	RD
Rosenbrock	Central Compuesto	SNR Y MEDIA
Zakharov	Central Compuesto	RD, SNR Y MEDIA

Las Tablas 6 y 7 proporcionan los mismos resultados, es decir, tanto la evaluación por medio de la distancia observada con respecto al punto óptimo como la ganancia conllevan a los mismos resultados.

CONCLUSIONES

Con referencia a los diseños de experimentos, los resultados muestran que el diseño central compuesto es el óptimo a emplearse para cada uno de los modelos utilizados, por lo que se concluye que la comparación entre los dos diseños centrales el compuesto e híbrido favorece al primero de estos, a pesar de que el híbrido proporciona una reducción en el tamaño del diseño, esta no es suficiente ventaja para preferirlos si se considera que con el central compuesto se obtienen distancias más pequeñas con respecto al óptimo del modelo, esto quiere decir que se generan mejores resultados en el proceso de minimizar la variable de respuesta.

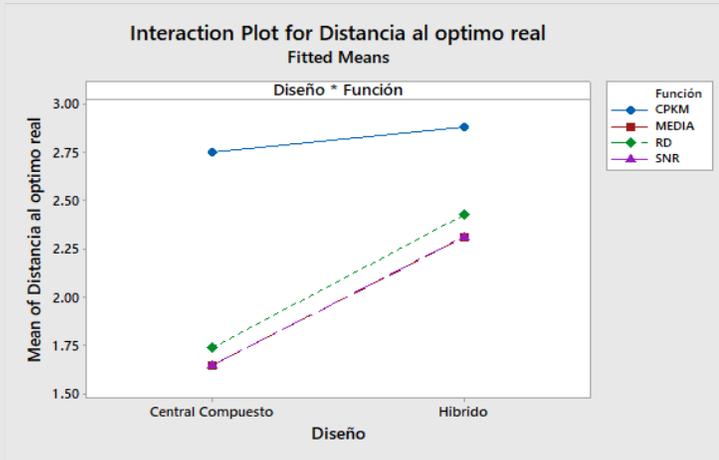


Figura 8. Gráfica de Interacción-Modelo Rosenbrock

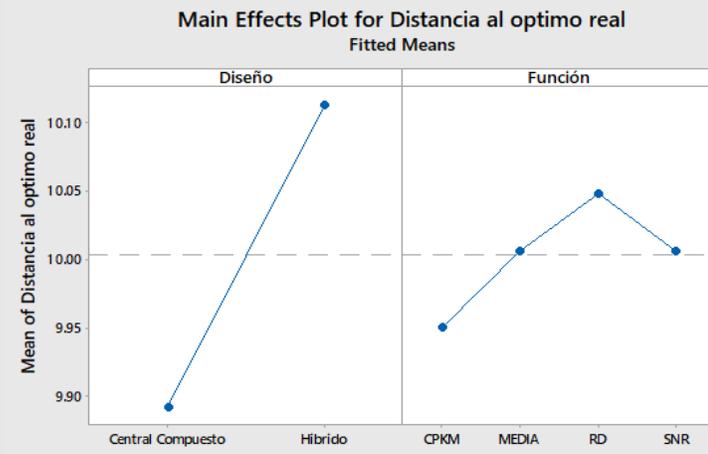


Figura 9. Gráfica de Efectos Principales-Modelo Zakharov

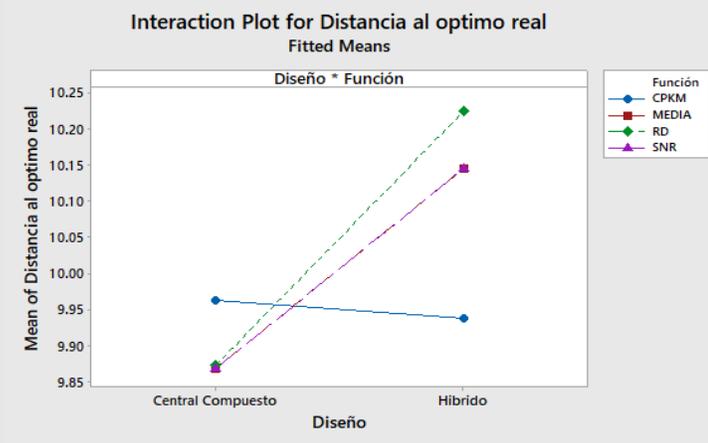


Figura 10. Gráfica de Interacción-Modelo Zakharov

Es importante hacer mención en las diferencias causadas por los distintos modelos utilizados (Esférico, Rosenbrock y Zakharov) con respecto a la significancia de los diseños en el modelo lineal general, para el caso de los modelos Esférico y Rosenbrock el diseño es significativo, pero no lo es en el modelo Zakharov, esto representa que depende de la complejidad del modelo para que los diseños puedan ser o no de importancia.

Las funciones para medir la respuesta C_{pk} y Respuesta Dual comparadas con la razón señal ruido brindan resultados diferentes entre sí, contrario a lo que concluye [8] y [9], para el caso de la Respuesta Dual se asemeja al comportamiento de la razón señal ruido, mostrando resultados en ocasiones incluso mejores (Modelos Esférico) lo que la hace una función apropiada para su uso. El C_{pk} por el contrario en todos los casos resulta ser menos eficiente (distancias más alejadas de los óptimos de los modelos) que la razón señal ruido y que la Respuesta Dual, con excepción del caso en el cual se evalúa con el Modelo Zakharov que es más eficiente que las otras dos funciones para tratar con los diseños híbridos. Lo anterior también indica que las funciones para medir la respuesta se ven afectadas por la complejidad de los modelos que se utilizan.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Cheng Q, Xiao C, Zhang G, Gu P and Cai L. (2014) *An Analytical Robust Design Optimization Methodology Based on Axiomatic Design Principles*. *Quality Control. Quality and Reliability Engineering International*, 30 1059–1073

[2] Arvidsson, M., & Gremyr, I. (2006). *Principles of Robust Design Methodology*. *Quality and Reliability Engineering International* 2008; 24:23–35.

[3] Myers R.H., Montgomery D.C. & Anderson-Cook C.M (2016). *Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Fourth Edition*. *United States of America: John Wiley & Sons, Inc.*

[4] Genichi, T., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. *John Wiley*

[5] Bao L, Huang Q and Wang K. (2016). *Robust Parameter Design for Profile Quality Control*. *Quality and Reliability Engineering International*, 32 1059–1070.

[6] Minitab17. Copyright (2016) Minitab Inc. All rights Reserved <http://www.minitab.com>.

[7] Excel (2013) Microsoft. <https://products.office.com/en-us/microsoft-office-2013>.

[8] Lom A, Sanchez J, Valles A and Hajar H. (2010). *PARAMETER DESIGN WITH CENTRAL COMPOSITE USING SIGNAL TO NOISE RATIO, DUAL RESPONSE AND PROCESS CAPABILITY INDEX*. *International Journal of Industrial Engineering, Special Issue – Mexico Conference*, 453-460, 2010.

[9] Lom A., Sánchez J., Hajar H. (2010). “Comparación de Razón Señal Ruido, Respuesta Dual y C_{pk} en la Metodología de Superficie de Respuesta”. *CIPITECH* 2010.



Calidad

y

Sistemas de
Manufactura

Ingeniantes

Uso de heurística vinculada a un sistema de información geográfica en el diseño de una red de transporte para el reparto de libros de texto gratuito

RESUMEN: Este estudio se realizó con la finalidad de crear una red de transporte para entregar los libros de texto gratuito (LTG) a 1,159 escuelas de nivel básico en la zona norte del Edo. de Chih. El total de escuelas se agrupó en dos conjuntos que se georreferenciaron dentro del mapa de Cd. Juárez, obteniendo dos sistemas nodales completos (SNC).

Aplicando el método de barrido a los SNC en el programa Arcmap del sistema de información geográfica (SIG) se dio solución al problema de ruteo de vehículos considerando su capacidad, los clusters se forman en grupos girando una semirrecta con origen en el almacén e incorporando las escuelas "barridas" por dicha semirrecta hasta llegar al límite de capacidad del camión de carga, de donde se obtuvieron todos los clusters necesarios para cubrir el total de escuelas. Cada cluster es luego ruteado resolviendo el problema del agente viajero y utilizando el programa RouteXL[®] se generaron las rutas de reparto para cada cluster de los dos SNC.

Como resultado se obtuvo un total de 56 clusters con sus respectivas rutas de reparto que cubren las 1,159 escuelas. Esto con una reducción de costos del 72.26% respecto a los costos de la distribución actual.

PALABRAS CLAVE: Georreferenciación, Cluster, Método de Barrido, Red de transporte, Sistemas de Información Geográfica.



Colaboración

Ricardo Rivas Corral; Mirella Parada González; Ulises Martínez Contreras, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

ABSTRACT: This study was carried out with the purpose of creating a transport network to deliver free textbooks (FTB) to 1,159 elementary schools at northern Chihuahua México. The total number of schools were grouped into two sets that are georeferenced within the map of Ciudad Juárez, obtaining two complete nodal systems (CNS).

Applying a heuristic approach called sweeping method to the CNS using the Arcmap program and the geographic information system (GIS) the problem of vehicle routing was solved considering the vehicles (trucks) capacity. The clusters were formed in groups by turning a line with origin in the warehouse and incorporating the schools using the heuristic method until the capacity restriction of the cargo truck is satisfied. This process was used until all the necessary clusters were obtained to cover the total number of schools. The routes for each cluster were calculated solving a problem called the traveling sales man (TSM). Using the RouteXL[®] program, the delivery routes for the two SNC's were generated. As a result, 56 clusters were obtained with their respective distribution routes covering the 1,159 schools with a reduction of about 72.26% in distribution costs.

KEYWORDS: Georeferencing, Cluster, Sweep Method, Transport Network, Geographic Information Systems.

INTRODUCCIÓN

La educación en México es un derecho fundamental resguardado en el artículo 3º de la constitución de 1917, donde se dan las garantías para que todos los individuos reciban por parte del estado una educación de calidad y los materiales educativos para su desarrollo, bajo el precepto de que la educación pública en nuestro país debe de ser laica y gratuita; por esta razón el plan nacional de desarrollo (PND) 2013-2018 que con-

templa las cinco metas nacionales: 1 Un México en Paz, 2 México incluyente, 3 México con educación de calidad, 4 México próspero y 5 México con responsabilidad global. Dentro del apartado México con educación de calidad se tiene como una de las estrategias, el programa B003 producción y distribución de libros y materiales educativos, enfocado a garantizar que alumnos y docentes de preescolar, primaria y secundaria de todo el país, cuenten con sus libros de texto gratuito (LTG) revisados y actualizados al inicio de cada ciclo escolar [8]. La dependencia encargada de proveer los LTG a las escuelas de nivel básico en todo México es la comisión nacional del libro de texto gratuito (CONALITEG) fundada en 1959 y aprobada durante la gestión del Expresidente Lic. Adolfo López Mateos. La cantidad de ejemplares que la CONALITEG produce cada ciclo escolar se determina a partir del número de alumnos inscritos en los distintos niveles y modalidades de educación básica, estos ejemplares son entregados a los centros de distribución (CD) de cada uno de los estados de la república, el gobierno de cada estado es responsable de realizar el reparto a todas sus localidades. En el estado de Chihuahua la Secretaría de Educación y Deporte (SEyD) es la dependencia encargada de ejecutar dicha labor. Ésta da inicio mediante el traslado de los LTG a los almacenes localizados en 9 municipios valorados como puntos de entrega estratégica, dentro de estos se encuentra el almacén de Cd. Juárez para llevar a cabo el reparto en los municipios aledaños de Ahumada, Guadalupe y Praxedis G. Guerrero, así como en la zona de Cd. Juárez. No obstante lo anterior, actualmente no se cuenta con un sistema de transporte para el traslado de los LTG desde el almacén hacia las 1159 escuelas de la región, incumpliendo con lo establecido en el programa B003 [9].

Componentes Clave de la Transportación

En este sentido se considera al transporte como una directriz importante de la cadena de suministros (SC, Supply Chain, en su acrónimo inglés), ya que involucra a distintos actores; transportistas, autoridades y prestadores de servicios auxiliares, con necesidades e intereses diferentes. Realiza funciones diversas; comunicación, integración, traslado de bienes y personas, entre otras. Y requiere de múltiples tareas para su ejecución: planeación, organización, diseño, construcción, mantenimiento, conservación y control de operación [4].

El estudio considera los componentes clave de la transportación que las compañías deben analizar al diseñar y operar una cadena de suministros según nos dicen [1], siendo éstos:

- I. Diseño de una Red de Transporte
- II. Elección de Modos de Transporte

El trabajo se centró tanto en la selección del modo de transporte, así como en resolver el problema de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP, Capacitated Vehicle Routing Problem, por sus siglas en inglés). La selección

del modo de transporte como se explica en el apartado de materiales y métodos, se llevó a cabo a partir de diversos factores, siendo el más importante la consulta de la ficha técnica de diferentes tipos de camiones, de lo que se obtuvo la carga útil de cada camión. De acuerdo al peso de los libros, se estimó la cantidad de libros por carga útil, y se definió el tipo de transporte a utilizar. Conociendo ya los tipos de camión se calcularon los costos de renta comparándose éstos con los gastos en que actualmente se incurre para trasladar los libros a cada escuela (con cargo a los padres de familia). Por otra parte, para resolver el CVRP se decidió aplicar el método heurístico: Asignar primero - Rutear después, también conocido como técnica o método de barrido (sweep method en inglés) [5]. Al aplicar esta técnica se decidió dividir las entregas en dos sistemas nodales completos, uno para las escuelas de nivel primaria y otro para las escuelas de preescolar y secundaria, generándose así 2 capas de datos (shapes) dentro del Sistema de Información Geográfica. Asimismo se generó una serie de rutas para satisfacer la demanda de los clusters en cada SNC.

Sistemas de Información Geográfica

A partir del gran volumen de información que se genera, surge la necesidad de manipular una gran cantidad de datos y éstos requieren de una interacción entre sí, por lo que se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés), que es un conjunto de hardware, software, datos geográficos, personas y procedimientos; organizados para almacenar, actualizar, analizar y desplegar eficientemente rasgos de información referenciados geográficamente [6].

El software ArcGIS® es un componente que usan las personas para interactuar con un SIG. Está integrado a su vez por las siguientes tres aplicaciones; ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox: ArcMap se usan para visualizar, editar datos geográficos, crear mapas profesionales, gráficos y reportes (siendo ArcMap la aplicación central). ArcCatalog: se usa para explorar, organizar, distribuir y documentar los datos del SIG. Y ArcToolbox: se usa para el geoprocesamiento, esto es; análisis, gestión y conversión de formatos y proyecciones de los mapas. Dentro de estas Aplicaciones se realizó la transferencia de datos de las escuelas de nivel básico desde su formato en Excel de la matriz del manejo de materiales por medio de georreferenciación de datos espaciales en los sistemas de coordenadas (x, y) en la traza urbana de Cd. Juárez en el ArcMap. Obteniendo con ello la correlación (match) de datos espaciales dentro de una zona geográfica, generando un shape para cada SNC de los tres niveles educativos con ubicación exacta de todas las escuelas en forma de puntos dentro del mapa de trabajo. Como se explicó anteriormente, para trabajar con la técnica de barrido se manejaron dos SNC uno que contiene el nivel primaria y otro los niveles preescolar y secundaria. La generación de rutas de reparto para cada cluster resultante se dio a partir de la interac-

ción del shape de los clusters en el programa ArcGIS® y su correlación con el programa RouteXL® siendo éste último un planificador de rutas para múltiples destinos, generando como resultado las rutas óptimas de reparto de la red de distribución para los LTG de las 1159 escuelas en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se siguió contempla cinco etapas: 1era. Recolección de la información y adquisición de la traza urbana de Cd. Juárez, 2da. Generación de los SNC con el manejo de materiales de cada nivel educativo, 3era. Elección del modo de transporte. 4ta. Método: Asignar primero - Rutear después. 5ta. Estudio económico de la red de transporte propuesta.

Recolección de la Información y Adquisición de la Traza Urbana de Cd. Juárez

Obtención de la traza urbana digitalizada de toda el área geográfica del problema, abarcando los municipios de Cd. Juárez, Guadalupe, Praxedis G. Guerrero y Ahumada: donde se ubicaron las 1159 escuelas de la región como un punto, georreferenciadas en coordenadas (x, y) generando una capa de datos geográficos para cada nivel educativo dentro del mapa en la aplicación ArcMap (véase el ejemplo del SNC de primarias en la Figura 1), y posteriormente se descargaron los atributos de información de cada una de las escuelas del ciclo escolar 2016-2017 por medio de tres matrices en Excel una por cada nivel educativo que facilitó la SEyD, conteniendo los nombres de las escuelas por grado, dirección, Turno, la clave de centro de trabajo (CCT), el total de alumnos por grado y escuela.

Con la información de las especificaciones físicas de los LTG que la CONALITEG proporciona en su portal en internet, se generó una matriz general para el manejo de materiales (véase Tabla 1), donde a partir del peso en kilogramos de cada uno de los libros utilizados en los diferentes grados escolares, se obtuvieron las cantidades y pesos de los libros utilizados por alumno dependiendo su grado de escolaridad, luego multiplicando éste por el total de alumnos de cada grado se obtuvo la cantidad del peso total de libros por escuela a transportar dentro de la red. Ingresando esta nueva información al SIG mediante georreferencia de datos en coordenadas (x, y).

Tabla 1. Matriz General de Manejo de Materiales por Escuela

ESCUELA	peso totales finales	Volumen total Final	X	Y	X_MOBY_MOO
JOSE MÉRGA GARCIA	7.384	0.0523576	359613.415	3468378.831	3863.4 68.831
FEDERICO FRIDEBEL 1374	1.9584	0.003975552	388834.204	3479761.4	39084 10.911
12 DE OCTUBRE	2.128	0.00437552	369557.767	3480904.821	36708 12.955
ELIOSA GARCIA BUBIUEL	1.9584	0.003975552	352655.658	3484659.045	32536 19.018
SOCIEDAD ANTONIA HERRERA AVILA 1279	7.888	0.01606832	380814.72	3487478.976	31065 19.225
TEOTIHUACAN	12.6528	0.025192564	370209.304	3489044.949	20559 20.795
GENERACION BICENTENARIO 2010	15.808	0.0402328	366628.354	3493063.753	18979 22.101
CATALINA MORENO TERPAZAS	10.7008	0.021495344	371762.633	3490758.371	22013 22.508
JOSE ROSAS MORENO	8.912	0.01636976	378449.587	3490014.595	28700 22.565
JARDIN DE INFANTES DR. CARLOS CANSECO 1404	2.894	0.00597694	372530.177	3490856.18	22791 22.606
LUCINA SAENZ HERRERA	17.5216	0.035975088	370531.855	3493024.407	2182 22.674
LUCINA SAENZ HERRERA	10.5856	0.021171488	370957.428	3493026.103	21207 22.676
CHICHENITZA	10.3512	0.02111536	370130.744	3493059.077	20381 22.719
BARRANCAS DEL COBRE	13.72	0.02697694	372131.042	3491888.229	22381 22.938
FELIX PARRA	12.3808	0.025188704	370763.382	3491552.235	20413 23.102
JESUS MACIAS DELGADO	9.312	0.020243956	374111.308	3491409.579	24661 23.160
CARLOS ORDOZCO ROMERO	18.4696	0.036923664	372539.954	3492331.638	22769 24.002
MARIA SAENZ HERRERA	13.2696	0.027256288	373471.071	3492822.982	23721 24.573
CARMEN IRIGOYEN DE RUIZ	18.4696	0.036923664	372836.302	3493150.583	23066 24.901
JOAQUIN RAMIREZ GUDIAN	32.2368	0.037110464	367412.312	3493501.878	17123 25.258
CONCEPCION MARCELY AVILA PANDIO	17.752	0.0363428	372618.068	3493555.771	22868 25.309
CHIHUAHUA	13.3024	0.027059552	371037.206	3493576.803	21287 25.327
MIGUEL HERRILCO 2002-2006	20.16	0.0400248	367806.311	3494284.882	18081 26.015
BICHAMPAN	13.3024	0.026961072	367522.255	3494294.591	18072 26.015
BASA SEACHI	21.1776	0.045053968	371937.887	3494294.919	22248 26.045
MARIA DEL REFUGIO HERMOSILLO ONTIVEROS	13.236	0.0275732	372422.475	3494323.176	22672 26.083
RAMARIS	3.988	0.00795184	377655.523	3494373.886	27436 26.124
TEMOCHACI	11.8556	0.024067168	370141.083	3494380.783	20391 26.131
CUSARARE	10.264	0.0214216	373477.339	3494690.947	23728 26.441
LARNE SABINES	25.5714	0.05191032	369655.827	3495241.225	19916 26.991
JULIA ROSA HOLGUIN POSADA	28.436	0.05738888	369634.837	3495258.13	18885 27.008
CARMEN SAENZ HERRERA	20.448	0.040680944	371173.208	3495406.261	21963 27.159

Generación de los SNC con el Manejo de Materiales de Cada Nivel Educativo

Tomando como referencia la información generada en la matriz para el manejo de materiales donde ahora se tienen los pesos en Kg de la cantidad total de libros por nodo georreferenciado dentro del mapa en sus respectivos shapes, estos datos se añaden a los sistemas nodales completos de cada nivel, como ejemplo se muestra el SNC de primarias con su manejo de materiales por escuela (véase la Figura 1). Una vez generado el SNC de primarias y el SNC de preescolar y secundarias abordamos la elección del modo de transporte pues éste afecta la velocidad y la eficiencia del flujo de productos a través de la cadena de suministros.

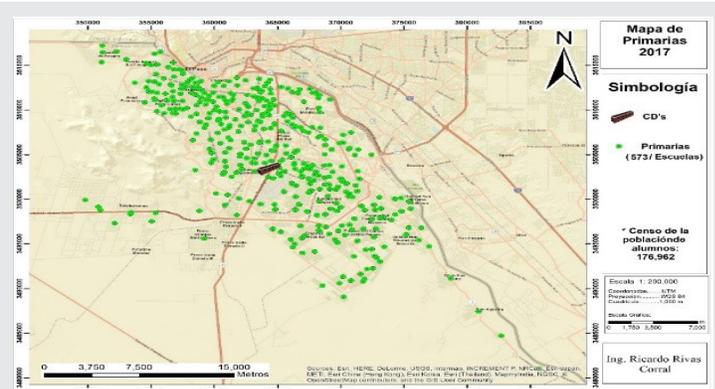


Figura 1. Mapa del SNC de Nivel Primaria en la Aplicación Arc-Map

Elección del Modo de Transporte

Seleccionar un medio de transporte es una decisión tanto de planeación como de operación, en términos comerciales, el sistema de transportación vincula desde el punto de vista geográfico, a socios e instalaciones de una compañía separados dentro de la SC [2].

Para determinar la selección de los medios de transporte se tomaron en consideración diversos factores físicos y parámetros físicos de las unidades, que generan una serie de condiciones para potenciar el uso de los mismos dentro de la red de distribución, siendo éstos los siguientes; 1. Dimensiones físicas del camión de carga y peso máximo de carga útil. 2. Unidades de caja conservadora (cc) para evitar daño del producto en tránsito. 3. Tecnología de GPS para monitorear las unidades. 4. Movilidad de las unidades en tránsito. 5. Tipo de combustible. 6. Costo de la renta del camión y accesibilidad de rentar las unidades a corto plazo.

Las unidades de transporte seleccionadas a partir de los factores anteriores son los camiones unitarios de carga tipo-C autorizados por la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT) para su libre tránsito en la región [3], siendo los modelos siguientes: A) El modelo de camión unitario de carga Ramon 4300 Low Profile caja conservadora (cc), con capacidad de carga útil de 10 Tn. B) El modelo Thorton 4400 cc, con capacidad de carga útil de 15 Tn.

Método: Asignar Primero - Rutear Después

El método Asignar primero y Rutear después (cluster first - route second) o técnica de Barrido (Sweep) procede en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarán en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo [7].

Este algoritmo puede aplicarse en problemas planos, en los que cada nodo se corresponde con un punto en el plano y las distancias entre ellos se definen como la distancia euclídea. Se supone que cada cliente i está dado por sus coordenadas polares (p_i, θ_i) en un sistema que tiene al depósito como origen.

Técnica de Barrido

Paso 1 (inicialización). Ordenar los clientes según θ de manera creciente. Si dos clientes tienen igual valor de θ , colocar primero el de menor valor de p . Seleccionar un cliente w para comenzar y hacer

$$k := 1 \text{ y } C_k := \{w\}. \quad \text{Ec. (1)}$$

Paso 2 (selección). Si todos los clientes pertenecen a algún cluster, ir a 3. Si no, seleccionar el siguiente cliente w_i . Si w_i puede ser agregado C_k sin violar las restricciones de capacidad, hacer

$$C_k := C_k \cup \{w_i\} \quad \text{Ec. (2)}$$

Si no, hacer $k := k + 1$ y crear un nuevo cluster $C_k := \{w_i\}$. Ir a 2.

Paso 3 (optimización). Para cada cluster C_k para $t = 1, \dots, k$, resolver un TSP con sus clientes.

Por la forma en que se generan los clusters, las rutas obtenidas no se superponen, lo que puede ser bueno en algunos casos. Un posible resultado de la aplicación de este algoritmo se muestra en la Figura 2 donde las líneas punteadas indican los límites de los clusters.

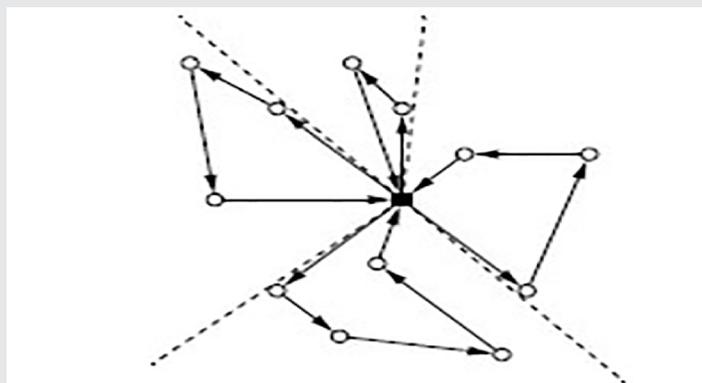


Figura 2. Solución Obtenida Mediante el Algoritmo de Barrido

El procedimiento se repite n veces, comenzando en cada ejecución por un cliente diferente.

Técnica de Barrido Aplicada al SNC de Escuelas Primarias

La obtención de los clusters en el SNC de las Escuelas de nivel primaria y de las escuelas de nivel secundaria y preescolar, utilizando la técnica de barrido en la aplicación ArcMap, está dada por las siguientes condiciones:

1. Se toma el centro de distribución o Almacén como punto de origen en $(0, 0^\circ)$ para realizar el barrido en un sector o cuadrante y delimitar el tamaño del cluster con los clientes (escuelas) a suministrar obteniendo así el C_k total.
2. Dentro de cada cluster se tienen escuelas donde; el turno matutino pertenece a una escuela con un ID y nombre único y el turno vespertino a otra escuela, estas escuelas serán tomadas como clientes individuales para la entrega de sus libros, más sin embargo conformaran un solo nodo ya que cuentan con la misma ubicación en el mapa de trabajo.
3. Restricción de capacidad en peso máximo de carga útil para el camión de reparto de 10 Tn y 15 Tn, con una contingencia al 90% del peso, tomando en cuenta un 5% de tolerancia en caso de un aumento de peso en el próximo ciclo escolar (esto a causa de un incremento en inscripción de alumnos por escuela), y otro 5% para cubrir el peso promedio de palets y el empaque de los LTG.

Aplicación del método de Barrido al SNC de las escuelas de nivel primaria (obsérvese Figura 3) obteniendo como resultado para el cluster No.1 los siguientes datos:

Paso 1: (inicialización) Al ordenar los clientes de manera creciente a θ , se seleccionó el cliente w (escuela) con menor valor en p , obteniendo $k := 1$ y $C_k := \{w\}$ siendo w la escuela con ID-570 con un peso total de 1010.97 kg.

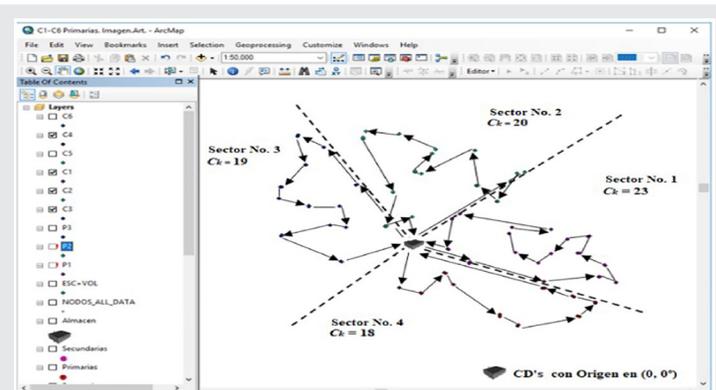


Figura 3. Generación de Clusters en el SNC de las Escuelas de Primarias, Aplicando la Técnica de Barrido en el Programa ArcMap

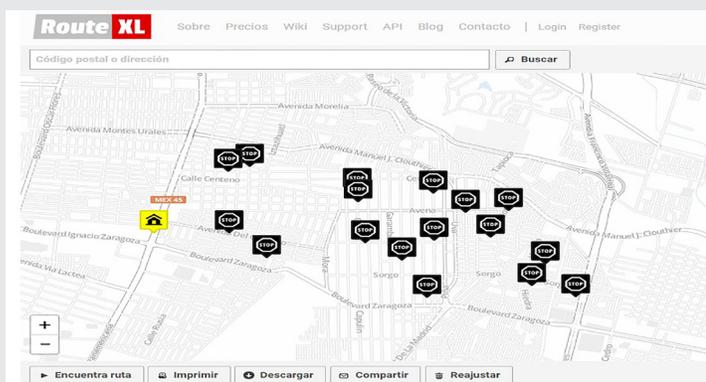


Figura 4. Ubicación de los Nodos del Cluster #1 en la Trazada Urbana de Cd. Juárez

Paso 2: (selección) ya que la capacidad del camión no se ha cumplido, se procede a añadir el siguiente cliente w_i , agregando esta escuela a $C_k := C_k \cup \{w_i\}$. Siendo w_i la escuela con ID-436 con un peso total de 343.03 kg. Realizando el paso 2 a los siguientes clientes, se obtuvo una sumatoria total en C_k de 23 escuelas con un peso de 13,729.73 kg, quedando dentro del rango de porcentaje en carga útil de la capacidad del camión de carga.

Paso 3: (optimización). Una vez delimitado el Cluster No.1 resolver un TSP con los 23 clientes generando un total de 17 nodos, este problema se resuelve mediante la transferencia del número de nodos obtenidos en el ArcMap, importándolos al programa generador de rutas RouteXL® por medio del comando "Import" dentro de la traza urbana de Cd. Juárez donde se muestran las ubicaciones de las escuelas como se ve en la Figura 4. (Esto se realiza mediante una conversión de coordenadas UTM a coordenadas geográficas en la línea de comando/ArcMap→Arc.Toolbox→Data.Management.tools→Projections.and.Transformations→Project). Y se prosigue con la generación de las rutas por medio del comando "Encontrar ruta" está despliega la ruta para el reparto de los LTG como podemos ver en la Figura 5.



Figura 5. Generación de la Ruta de Reparto de las Escuelas de Primaria del Cluster #1

El procedimiento anterior se repitió n veces hasta generar el número total de clusters y las rutas de reparto con sus itinerarios para ambos SNC que se pueden ver en el apartado de resultados. Una vez obtenidas todas las rutas de reparto se pudo calcular el número de camiones que deben rentarse, quedando como sigue; 1 camión unitario de carga Rabón 4300 de 10tn durante un periodo de 11 días, 3 camiones Thorton 4400 de 15tn durante un periodo de 21 días.

Estudio Económico de la Red de Transporte Propuesta. Los costos estimados para el funcionamiento de la red de transporte propuesta se obtienen de los siguientes factores: 1) Pago al personal encargado de las unidades de transporte. 2) Costo por el consumo de combustible diésel de los camiones de carga para cubrir el total de km ruteados de la red de reparto (véase Tabla 2 y 3) Costo por la renta de las unidades requeridas para la red de transporte propuesta (véase Tabla 3).

Tabla 2. Costo Total por el Consumo de Combustible Diésel de la Red de Reparto Completa.

COSTO TOTAL DEL COMBUSTIBLE DE LA RED DE REPARTO				
CAMIÓN UNITARIO	Litros de Diésel	Costo x lt (+ 1.1% de Gasto-Extra)		Total
Camión 10 tn	176.4 lt x	\$18.06	x 1.1	3,464
Camión 15tn	712 lt x	\$18.06	x 1.1	14,144
COSTO TOTAL				\$17,608

A continuación, se realizan los estimados para los costos de los camiones de carga por los días de renta para repartir el total de clusters dentro de los dos SNC's.

Tabla 3. Costo Total por los Días de Renta de los Camiones de Carga.

COSTOS POR DÍAS DE RENTA DE LOS CAMIONES DE CARGA				
SNC de Prees.ySec.	Días de uso	Costo x día	Costo x días de uso	(+ IVA)
Camión 10 tn	11 x	\$2,332	25,652	\$29,756
Camión 15tn	19 x	\$2,579	49,001	\$56,841
SNC de Esc. Primaras				
Camión 15tn	22 x	\$2,579	56,738	\$65,816
Camión 15tn	22 x	\$2,579	56,738	\$65,816
COSTO TOTAL				\$218,229

Los costos estimados de cada factor se muestran en la Tabla 4, dando como resultado el costo total de \$ 256,180 pesos. M.X. para la red de transporte propuesta.

Tabla 4. Costo Total de la Red de Transporte Propuesta.

COSTO TOTAL DE LA RED DE TRANSPORTE DE LOS LTG				
Costos X Concepto de:	Salario diario de Chofer	Salario de Auxiliar	# de Días	Total
1. Pago a Personal				
Camión 10 tn	\$148	126.56	11	\$3,023.90
Camión 15 tn	\$148	126.56	63	\$17,318.70
2. Consumo de Combustible				
Camión 10 tn				3,464
Camión 15tn				14,144
3. Renta de Camiones				\$218,229
COSTO TOTAL				\$256,180

Análisis de Beneficios – Con el costo total de la red propuesta, se calcula la relación costo x alumno, para obtener una estimación del costo que conlleva entregarle sus libros al inicio del ciclo escolar a cada alumno de los 297,003 inscritos en el nivel básico, de donde obtenemos:

Costo x alumno = Costo total de la red de transporte / Número de alumnos inscritos;

\$ 256,180 / 297,003 al. = \$ 0.86 x alumno.

El costo que obtenemos por la entrega de libros por alumno es de \$ 0.86 pesos.

Para realizar el análisis de minimización de costos entre la red de transporte propuesta contra la renta de camiones por parte de la sociedad de padres de familia (como se realiza actualmente), para el traslado de libros desde el almacén hacia las escuelas, se utiliza como ejemplo el cluster #18 del sistema de escuelas Primarias.

Basándonos en los costos de renta de los camiones, se realizó un cuadro comparativo del cluster #18 (véase Tabla 6) entre los costos de la red de transporte propuesta (véase Tabla 5) y el costo del transporte que es cubierto actualmente por parte de las sociedades de padres de familia. A la fecha los padres de familia de cada una de las escuelas acuden al almacén por sus LTG en un vehículo rentado que les cuesta en promedio \$600 pesos.

Tabla 5. Costos Generados a la Red de Transporte por el Reparto en el Cluster #18

COSTO TOTAL DE LA RED DE TRANSPORTE DE LOS LTG				
Costos X Concepto de:	Salario diario de Chofer	Salario de Auxiliar	# de Días	Total
1. Pago a Personal				
Camión 10 tn	\$148	126.56	11	\$3,023.90
Camión 15 tn	\$148	126.56	63	\$17,318.70
2. Consumo de Combustible				
Camión 10 tn				3,464
Camión 15tn				14,144
3. Renta de Camiones				
				\$218,229
			COSTO TOTAL	\$256,180

Tabla 6. Cuadro Comparativo de Costos Entre la Red de Transporte y la Renta de Camiones por parte de la Sociedad de Padres de Familia en el Cluster #18.

Costo x Reparto de los LTG en SN- Esc. Primarias / Cluster #18		
C18: (21w-14n)	Red de Transporte	Renta de camiones x SPF*
N1	\$257.14	\$600
N2:2w	\$257.14	\$1,200
N3	\$257.14	\$600
N4	\$257.14	\$600
N5	\$257.14	\$600
N6:2w	\$257.14	\$1,200
N7	\$257.14	\$600
N8:2w	\$257.14	\$1,200
N9	\$257.14	\$600
N10:2w	\$257.14	\$1,200
N11	\$257.14	\$600
N12:2w	\$257.14	\$1,200
N13:2w	\$257.14	\$1,200
N14:2w	\$257.14	\$1,200
	\$3,599.96	\$12,600.00
		Coste Total

* SPF: Sociedad de Padres de Familia

Es a partir de las estimaciones anteriores que se obtuvieron los costos de ambas formas de reparto. Donde el costo por traslado de los LTG a los 14 nodos que contienen las 21 escuelas (w) del cluster #18, mediante la red de transporte tiene un costo total de \$ 3,599 pesos.

Por otra parte, el costo para realizar la misma tarea por parte de la Sociedad de Padres de Familia, está dado por la multiplicación de las 21 escuelas x \$ 600 pesos del costo de la renta del camión, dando un total de: \$ 12,600 pesos.

RESULTADOS

El resultado del análisis de minimización de costos de la red de transporte vs el costo de la renta de camiones por parte de la sociedad de padres de familia es de un 72.26 % menor. Dándonos un estimado favorable de la red de transporte propuesta a la SEyD y ya que en ninguna circunstancia el costo generado por la red de transporte supera a la renta de camiones por parte de los padres de familia. Es en virtud de estos resultados que la red de transporte se considera un proyecto viable para el reparto de los LTG en la región por parte de la SEyD.

Los resultados obtenidos de los SNC se concentran en las Tablas 7 y 8, donde se aprecia la siguiente información: a) La columna No.1 muestra el total de clusters generados para cada SNC. b) La columna No.2 muestra el total de escuelas (w o clientes) suministradas en el cluster. c) La columna No.3 muestra el número total de nodos. d) La columna No.4 muestra la dirección en http: de cada una de las rutas de reparto en el Paq. RouteXL®.

Tabla 7. Clusters del SNC de las Escuelas de Nivel Primaria

CLUSTERS	# de Clientes	# de Nodos	Rutas de Reparto en Pag. RouteXL, Dir: HTTP
C1	23w	17n	http://www.routexl.es/f=CL4j0K7U0001
C2	21w	16n	http://www.routexl.es/f=36Fq2QEvm6gl
C3	19w	12n	http://www.routexl.es/f=7vsT9HZ6T5s7
C4	18w	10n	http://www.routexl.es/f=0GryeAEq8sE0
C5	21w	16n	http://www.routexl.es/f=twPT8Xvenk30
C6	26w	21n	http://www.routexl.com/f=Be6Ng4y1m4bk
C7	15w	8n	http://www.routexl.com/f=ix8yA5PS3qV3
C8	13w	8n	http://www.routexl.com/f=2qZ2rgy8vGE5
C9	15w	10n	http://www.routexl.com/f=099Q9P5z9BT9
C10	10w	5n	http://www.routexl.com/f=1W6288a0N9k1
C11	17w	9n	http://www.routexl.com/f=2GqOZY2qVLa
C12	14w	7n	http://www.routexl.com/f=p6J8GlaNwU9
C13	14w	8n	http://www.routexl.com/f=BaLvU6y7ugwZ
C14	28w	25n	http://www.routexl.com/f=D7LovkQ8wZk0
C15	30w	28n	http://www.routexl.com/f=vT7Yl360TCWF
C16	16w	9n	http://www.routexl.com/f=p6J8GlaNwU9
C17	24w	18n	http://www.routexl.com/f=IEDtGw5bQcAG
C18	21w	14n	http://www.routexl.com/f=B05i34j93opH
C19	10w	5n	http://www.routexl.com/f=WZKkiKX1D643
C20	14w	9n	http://www.routexl.com/f=pB60ZuCO2v19
C21	10w	5n	http://www.routexl.com/f=LOC731fAV8KB
C22	14w	8n	http://www.routexl.com/f=3pp1F9w26T81
C23	29w	28n	http://www.routexl.com/f=Qg0v1Lbv7m7
C24	26w	22n	http://www.routexl.com/f=RBWS9G56k93z
C25	22w	16n	http://www.routexl.com/f=B2F90KYMBv70
C26	18w	13n	http://www.routexl.com/f=zE73TCd7jFMU
C27	16w	11n	http://www.routexl.com/f=GA01KyU15HCH
C28	8w	4n	http://www.routexl.com/f=Cvi0t41Oa9Sv
C29	17w	11n	http://www.routexl.com/f=221342v3o8l
C30	13w	8n	http://www.routexl.com/f=QCif96U9D77w
C31	13w	8n	http://www.routexl.com/f=x629F23qp2I
C32	8w	8n	http://www.routexl.com/f=AkEC2SL7AVwo
C33	9w	7n	http://www.routexl.com/f=pH82w3sz8PTy

Tabla 8. Clusters del SNC de las Escuelas de Nivel Preescolar y Secundarias

CLUSTER	# de Clientes	# de Nodos	Rutas de Reparto en Pag. RouteXL, Dir: HTTP
C1	34w	29n	http://www.routexl.com/f=8BshlCldtwvX
C2	29w	26n	http://www.routexl.com/f=l22BEp2zzOjb
C3	20w	16n	http://www.routexl.es/f=e3qtr2qVv356
C4	33w	28n	http://www.routexl.com/f=eXDC8O3P27d5
C5	36w	30n	http://www.routexl.com/f=Xxp30b8DY65v
C6	24w	17n	http://www.routexl.es/f=h2T1dx7609na
C7	28w	25n	http://www.routexl.com/f=3NAiMr9gl9Dr
C8	20w	16n	http://www.routexl.es/f=D8F8tr7ULgM9
C9	31w	20n	http://www.routexl.com/f=cZU6l9ulmIB4
C10	20w	16n	http://www.routexl.es/f=9H6Z6nxFeTN3
C11	40w	34n	http://www.routexl.com/f=zgVN353vg84y
C12	31w	26n	http://www.routexl.com/f=X40VzXeZdtT6
C13	26w	19n	http://www.routexl.com/f=679srSpvHTqe
C14	25w	21n	http://www.routexl.com/f=rys5OvipwtiS
C15	35w	31n	http://www.routexl.com/f=u0Be51L3q80v
C16	29w	29n	http://www.routexl.com/f=99wyS1HKoM8N
C17	22w	22n	http://www.routexl.com/f=72nP85HFJY5f
C18	14w	9n	http://www.routexl.com/f=5jnUmRK3zi00
C19	17w	11n	http://www.routexl.com/f=53Lq81jzkE22
C20	28w	23n	http://www.routexl.com/f=K8U0A3lJn69v
C21	23w	19n	http://www.routexl.com/f=9IA4R8B5M6JW
C22	6w	6n	http://www.routexl.com/f=78Cx9Y832bd4
C23	15w	13n	http://www.routexl.com/f=a57b59G4yAkq

CONCLUSIONES

Aplicando el método de barrido en el SIG, se determinó un total de 56 clusters con sus rutas de reparto óptimas para llevar a cabo la entrega de los LTG a las 1159 escuelas de nivel preescolar, primarias y secundarias ubicadas en la zona norte del Estado de Chihuahua, México.

De acuerdo con el calendario normal, al año los alumnos tienen 195 días de clase, donde bajo la situación actual, los alumnos reciben sus libros alrededor de 18 días hábiles después del inicio del ciclo escolar. (pierden 9.23% del año escolar).

En ese sentido la red de transporte tiene una eficacia de entrega del 100%, ya que las entregas se realizan antes del inicio del ciclo escolar, generando así un bienestar académico entre el sector estudiantil de la región.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Chopra, S. y Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro*. 3era Edición. Pearson Educación. Naucalpan de Juárez, Estado de México, México.

[2] Coyle, J.J., Langley, C.J.Jr., Novack, R.A., Gibson, B.J. (2013). *Administración de la cadena de suministro. Una perspectiva logística*. 9na Edición. Cengage Learning Editores. Santa Fe, D.F., México.

[3] *Diario Oficial de la Federación*. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de auto transporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. Ciudad de México, D.F., México.

[4] García, O.G. y Backhoff, P.M.A. (1992). *Los Sistemas de Información Geográfica y el Transporte*. P. Escobedo, Querétaro, México.

[5] González, V.G. González, A.F. (2007). *Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 2: Algoritmo genético, comparación con una solución heurística*. *Revista ingeniería e investigación*. vol. 27, núm.1, 149-157.

[6] Huxhold, W.E. y Levinsohn, M. A. (2001). "Sistemas de Información Geográfica", Edición Universidad de Oxford, Nueva York.

[7] Orrego Cardoz, J., & Ospina Toro, D., & Toro Ocampo, E. (2016). *Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística*. *Scientia Et Technica*, 21 (3), 225-233.

[8] *Secretaría de Educación Pública*. (2014). *B003 Edición Producción y Distribución de Libros y otros Materiales Educativos*. México, D.F., México.

[9] SEP. (2016). *Libros de texto gratuitos, ciclo escolar 2016-2017 catalogo (1ª Edición)*. El Márquez. Querétaro.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación realizado en el presente artículo fue desarrollado gracias a la cooperación brindada en todo momento por la Secretaría de Educación y Deporte del estado de Chihuahua, México.



Calidad

y

Sistemas de
Manufactura

Ingeniantes

Análisis de factores multidimensionales de la calidad del servicio en cafeterías de instituciones educativas utilizando SERVPERF

RESUMEN: Este trabajo presenta el análisis de la calidad en el servicio de una cafetería ubicada dentro de una institución de educación superior. Para el desarrollo de la investigación se identifica que no se cuenta con una medida que cuantifique la percepción real que los estudiantes tienen acerca del servicio. Para lograr el objetivo, se diseñó una encuesta basada en el modelo SERVPERF, ajustada a las necesidades de la concesionaria, tomando como referencia estudios previos realizados en el sector restaurantero y en cafeterías universitarias. La escala propuesta está constituida por 3 dimensiones: Alimentos y bebidas, Fiabilidad e Infraestructura, con un total de 18 ítems. La consistencia interna u homogeneidad entre las preguntas se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, cuyo valor fue de 0.918, por tanto, se puede afirmar que el instrumento es válido y confiable para medir la calidad en el servicio brindado por la cafetería. La muestra de 95 estudiantes es adecuada para efectuar un análisis factorial, puesto que, la prueba KMO arrojó un valor de 0.855 y la de esfericidad de Barlett resultó ser significativa. El análisis factorial evidencia que las tres dimensiones propuestas son determinantes, ya que, explican el 57.62% de la variabilidad.

PALABRAS CLAVE: Calidad en el servicio, Cafetería, Percepción, SERVPERF, alfa de Cronbach, Análisis factorial



Colaboración

Miguel Ángel Hernández Díaz; Jorge Roberto de Jesús Maravilla Tiburcio; Alicia de Jesús Fernández Maldonado; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Miantla

ABSTRACT: This paper presents the analysis of quality in the service of a Coffee Shop located within a higher education institution. For the development of the research it is identified that there is no measure that quantifies the real perception that students have about the service. To achieve the objective, a survey was designed based on the SERVPERF model, adjusted to the needs of the concessionaire, taking as a reference previous studies carried out in the restaurant sector and in university cafeterias. The proposed scale consists of 3 dimensions: Food and Beverages, Reliability and Infrastructure, with a total of 18 items. The internal consistency or homogeneity between the questions was evaluated using the Cronbach alpha coefficient, whose value was 0.918, therefore, it can be said that the instrument is valid and reliable to measure the quality of the service provided by the Coffee Shop. The sample of 95 students is adequate to perform a factorial analysis, since, the KMO test showed a value of 0.855 and the sphericity test of Barlett turned out to be significant. The factor analysis shows that the three proposed dimensions are determinant, since they explain 57.62% of the variability.

KEYWORDS: Service Quality, Coffee Shop, Perception, SERVPERF, Cronbach alpha, Factorial analysis

INTRODUCCIÓN

En el entorno que vivimos, la calidad se convirtió en un aspecto indispensable en las empresas, especialmente en las empresas de servicio. Para poder ocupar un lugar en el mercado y tener una ventaja competitiva, es necesario que las empresas ofrezcan productos y servicios de calidad. Hoy en día los consumidores son más exigentes en este aspecto, y para poder cubrir sus expecta-

tivas es muy importante saber qué es lo que desean y cuál es el nivel de calidad que se les ofrece [1].

De nada sirve que una organización mejore asiduamente sus procesos o procedimientos para ser más eficiente en la parte operativa, si cuando ofrece su producto y/o servicio al cliente lo hace de manera deficiente, generando en él una sensación de insatisfacción, que puede desembocar en la pérdida del prospecto o en el peor de los casos contribuir a que la empresa pierda ventajas competitivas que la hagan desaparecer. En ese sentido, en el momento que surge la competencia institucional, es cuando la calidad se convierte en una pieza angular para las organizaciones, ya que, a través de ella se obtienen verdaderos clientes que garantizan la supervivencia [2]. Ahora bien, que una empresa piense que está ofertando un bien o un servicio de calidad, no significa que el cliente o consumidor lo está evaluando así, ya que, la satisfacción es un constructo teórico que está influido tanto por factores cognitivos como culturales.

Un servicio es la actividad y/o beneficios que producen satisfacción a un consumidor [3]. Dado que los servicios presentan características particulares o naturales frente a los productos, tales como: intangibilidad, heterogeneidad, inseparabilidad y carácter perecedero, resulta más difícil evaluar su nivel de calidad [4]. Normalmente las organizaciones emplean solo los aspectos tangibles de su negocio para cuantificar el nivel de calidad, sin embargo, la calidad técnica no brinda todo el espectro necesario, pues se ha encontrado que la calidad funcional y la medición de expectativas versus percepciones por parte de los consumidores es vital para entender sus necesidades y de qué manera satisfacerlas [5].

El objetivo fundamental de la calidad es la satisfacción del cliente, la cual es un juicio global del consumidor que resulta de la comparación entre las expectativas sobre el servicio que va a recibir con las percepciones que tenga de la actuación de la empresa; es por eso que, si se definen bien los requerimientos, que son la traducción de las expectativas del cliente, la satisfacción sale reforzada [6].

La calidad en el servicio es esencial para la eficacia de las organizaciones, tanto privadas como públicas [7]. Se define como el resultado de un proceso de evaluación donde el consumidor compara sus expectativas frente a sus percepciones [1]. La calidad del servicio se produce durante la prestación del mismo, generalmente en una interacción entre el cliente y el personal de contacto de la organización, por lo que, la calidad del servicio depende en gran medida del desempeño de los empleados. De modo que, las acciones que se implementan para

mejorar la calidad en el servicio requieren de una medición de referencia que permita evaluar sus resultados [7].

De lo anterior, será de utilidad para el concesionario de la Cafetería del Instituto Tecnológico de Veracruz, así como para los directivos de la institución medir la percepción que tienen los estudiantes de la calidad del servicio ofertado. De ahí que, el objetivo general de este estudio es determinar la percepción real de la calidad del servicio de la cafetería del Instituto Tecnológico de Veracruz mediante la adaptación del modelo SERVPERF. Con los siguientes objetivos específicos: a) Caracterizar la situación actual de la cafetería mediante la herramienta de diagnóstico FODA, b) Calcular el tamaño de la muestra, c) Diseñar el instrumento de medición (dimensiones y atributos), d) Validar la confiabilidad del instrumento de medición y e) Identificar los factores determinantes de la calidad en el servicio a través de un análisis factorial.

La contribución práctica de este trabajo radica en que los resultados obtenidos pueden ayudar a la toma de decisiones sobre asignación de recursos humanos y físicos en áreas específicas (dimensiones), permitiendo entre otras cosas, sugerencias estratégicas para mejorar la percepción de la calidad del servicio [8].

MATERIAL Y MÉTODOS

Existe una gran diversidad de modelos de medición en el sector de servicios, pero los más utilizados son SERVQUAL y SERVPERF, medidas cuya fiabilidad y eficacia ya han sido demostradas por innumerables investigaciones empíricas [9].

Ambos modelos permiten medir la calidad de cada una de las dimensiones y entender estratégicamente las variables estudiadas [6]. El modelo SERVQUAL es sin lugar a duda el planteamiento más utilizado por los académicos hasta el momento, dada la proliferación de artículos en el área que usan su escala [3]. Fue propuesto por Parasuraman, Zeithaml y Berry en 1985, quienes, con la intención de medir la calidad en empresas de servicios, desarrollan una metodología constituida por 10 dimensiones y 22 ítems, la cual modifican en 1988 después de múltiples críticas y como resultado de análisis estadísticos, quedando las siguientes cinco: tangibilidad, fiabilidad, capacidad de respuesta, seguridad y empatía. En su propuesta argumentan que para el constructo calidad del servicio, la satisfacción por el servicio obtenido es el resultado positivo o negativo de evaluar las diferencias entre las expectativas, que es lo que el cliente espera del servicio, y de las percepciones, que es la sensación real que obtiene después de la ejecución del mismo. Por otro lado, Cronin y Taylor, en 1992, proponen una medida solo

basada en las percepciones, surgiendo así la escala SERVPERF (Service Performance), la cual es más corta y presenta menores problemas de validez [9]. También puede tornarse menos dispendiosa por no tener que aplicar las dos encuestas [10].

Parte fundamental de que el SERVPERF sea considerado más conveniente y valioso en ésta investigación, deriva de los siguientes dos escenarios. En el primero, se considera que un cliente tiene o maneja siempre expectativas altas de manera generalizada ante las actividades que componen un servicio, por lo tanto, al medir la brecha expectativa-percepción se llegaría siempre a un resultado no satisfactorio. En el segundo, considerando que algunas personas regularmente no presentan expectativas ante los servicios que utilizan, el resultado de la calidad del servicio percibido siempre se reflejaría como positivo o en niveles cercanos al ideal. La consecuencia directa de estas dos situaciones es que no se puedan identificar áreas de oportunidad reales.

En la Figura 1 se representan las fases que conforman la metodología empleada en este trabajo de investigación, la cual fue elaborada con base en la propuesta de [9], ya que, es el único antecedente encontrado hasta el momento en lo que concierne a los servicios prestados por cafeterías a nivel universitario.

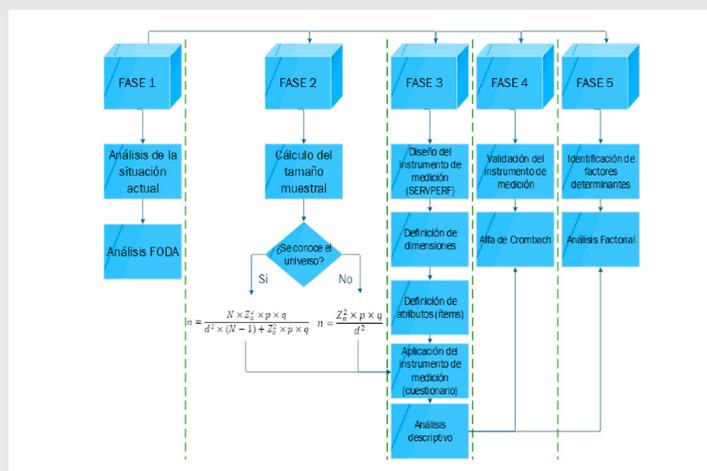


Figura 1. Diagrama de la metodología utilizada. Fuente: Elaboración propia

1. Análisis de la situación actual

En esta primera fase se realizó el diagnóstico del sistema actual utilizando una herramienta perteneciente a la administración estratégica, que es el análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). En la Figura 2 se detecta que el servicio que presta la cafetería del Instituto Tecnológico de Veracruz presenta algunas debilidades o deficiencias internas que pueden representar áreas de oportunidad para proponer mejoras. Una de ellas, es

que no se cuenta con una medición cuantitativa de cómo perciben el servicio los clientes, que sirva de punto de partida para la toma de decisiones.



Gráfica 2. Análisis FODA. Fuente: Elaboración propia

2. Cálculo del tamaño muestral

El Instituto Tecnológico de Veracruz tiene una población de 5,251 estudiantes, de acuerdo con datos publicados por el Departamento de Planeación, Programación y Presupuestación en el prontuario estadístico enero-junio 2018, los cuales son la población o el universo de este estudio. Encuestar a todos resultaría muy costoso, por lo que, se calculó una muestra representativa a partir de la ecuación Ec. 1, la cual, con base en la teoría de muestreo, es la que se utiliza en muestreos no probabilísticos y cuando se tiene conocimiento del tamaño de la población.

$$N = \frac{N \times Z_a^2 \times q \times p}{d \times (N - 1) + Z_a^2 \times q \times p} \quad \text{Ec. (1)}$$

La ficha técnica de esta investigación se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Ficha técnica

Característica	Valor
Universo	Clientes de la cafetería
Tipo de muestreo	Muestreo no probabilístico
Tamaño de la muestra	$n = \frac{N \times Z_a^2 \times q \times p}{d \times (N-1) + Z_a^2 \times q \times p} = 95$
Error de la muestra	± 0.1
Nivel de confianza	95%; $Z_{0.05} = 1.96$; $p = 0.5$; $q = 0.5$
Método de recolección de datos	Encuesta personalizada

Fuente: Elaboración propia

3. Diseño del instrumento de medición (SERVPERF)

En esta tercera fase, se definieron las dimensiones que aseguraran la evaluación de la calidad del servicio de la cafetería [9]. Para ello, se tomaron en cuenta los estudios de [11], [4] y [9], cuyas escalas se ajustaron a los requerimientos de la entidad universitaria. El diseño resultante se muestra en el Anexo 1. Se integró por 18 atributos (ítems) agrupados en tres dimensiones: Alimentos y bebidas, Fiabilidad e Infraestructura. Se utilizó la escala de Likert que mide actitudes o predisposiciones individuales en contextos sociales particulares [10], tomando una escala de 1 a 5, donde: 1 = muy mala, 2 = mala, 3 = regular, 4 = buena y 5 = muy buena.

Para la aplicación de la encuesta se recurrió a la herramienta tecnológica Google Drive, la cual fue contestada por los 95 comensales (muestra) en menos de 4 horas.

RESULTADOS

En la Tabla 2 se exponen los resultados del análisis descriptivo de los ítems (medias), las cuales fueron obtenidas mediante el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) ®. Así mismo, cabe recordar que las puntuaciones que fueron tomadas están entre 1 (muy mala) y 5 (muy buena). Se logra observar que entre los ítems con medias más elevadas se encuentran la higiene del personal (\bar{x} =3.389), la iluminación de la cafetería (\bar{x} =3.358), la temperatura de los alimentos y de las bebidas (\bar{x} =3.305) y la comodidad y ambiente de la cafetería (\bar{x} =3.168). Por su parte, los factores que peor fueron evaluados por la muestra fueron los siguientes: el nivel del ruido de la cafetería (\bar{x} =2.516), la relación entre la calidad de los alimentos y bebidas (\bar{x} =2.684), la decoración y mobiliario de la cafetería (\bar{x} =2.811), la rapidez del servicio (\bar{x} =2.895) y la amabilidad del personal (\bar{x} =2.968).

4. Validación del instrumento de medición

Para determinar que la encuesta se encuentra libre de errores aleatorios y obtener la fiabilidad del conjunto de elementos que la conforman, se calculó el coeficiente de consistencia interna alfa de Cronbach “(α)” estandarizado, con el cual se toman en cuenta las correlaciones lineales de las preguntas [1]. Considerando que el valor en la medida que se acerca a 1 indica una mayor confiabilidad y que de acuerdo con [12] los coeficientes de alfa de Cronbach pueden ser evaluados como: coeficiente alfa > 0.9 es excelente; coeficiente alfa > 0.8 es bueno, coeficiente alfa > 0.7 es aceptable, puede decirse que las 18 preguntas de la encuesta (medidos en la escala de Likert) presentan una consistencia interna excelente, ya que, presentan un valor global de $\alpha = 0.918$. Por subescalas, la variable Alimentos y bebidas tiene una confiabilidad buena con un valor de $\alpha = 0.835$, mientras que las variables de fiabilidad y la de Infraestructura presentan confiabilidades aceptable y buena, con valores de $\alpha = 0.774$ y $\alpha = 0.867$ respectivamente (Tabla 3).

Tabla 2. Ficha técnica

Dimensión	Ítems	Media
Alimentos y bebidas	1 La variedad de alimentos y bebidas que se ofrecen es	3.042
	2 La calidad de los alimentos y bebidas es	3.084
	3 El sabor de los alimentos y bebidas es	3.063
	4 La temperatura de los alimentos y bebidas es	3.305
	5 La cantidad de los alimentos y bebidas que se sirve es	3.158
	6 La presentación del alimento que se sirve es	3.021
	7 La relación entre la calidad de los alimentos y bebidas con el precio es	2.684
Fiabilidad	8 La amabilidad del personal que lo atiende es	2.968
	9 La rapidez del servicio es	2.895
	10 La higiene del personal que lo atiende es	3.389
Infraestructura	11 La comodidad y ambiente de la cafetería es	3.168
	12 La decoración y mobiliario de la cafetería es	2.811
	13 La limpieza de la cafetería es	3.158
	14 La iluminación de la cafetería es	3.358
	15 La temperatura de la cafetería es	3.084
	16 El nivel del ruido de la cafetería es	2.516
	17 La limpieza y equipamiento de los lavabos es	3.074
	18 El olor dentro de la cafetería es	2.737

Fuente: Elaboración propia con software SPSS

Tabla 3. Estadísticas Descriptivas de los Ítems

Variables de la calidad del servicio	Alfa de Cronbach (Unidad de análisis 95)	No. De Ítems	Evaluación
Alimentos y bebidas	0.835	7	Bueno
Fiabilidad	0.774	3	Aceptable
Infraestructura	0.867	8	Bueno
Total	0.918	19	Excelente

Fuente: Elaboración propia con software SPSS

5. Identificación de factores determinantes

La identificación de los factores que determinan la calidad del servicio de la cafetería se realizó usando la técnica estadística del análisis de factores [4]. Previo se verificó la adecuación muestral de los datos disponibles mediante dos indicadores del grado de asociación de las variables como son la prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de esfericidad de Bartlett [9].

Las correlaciones de los ítems obtenidas son en su mayoría superiores a 0.5 con un nivel de significancia del 5%, excepto en el ítem 7 (relación entre la calidad de los alimentos y bebidas con respecto al precio), que arroja un valor de $r=0.459$; por lo que, se tiene que evaluar la conveniencia que tendría eliminar dicho elemento de la escala. Observando el coeficiente alfa de Cronbach (α) que resultaría de suprimir el elemento 7 ($\alpha=917$), se consideró prudente no eliminarlo, dado que no genera una mejora sustancial en la consistencia interna. El KMO obtenido en este estudio fue de 0.855 y la prueba de esfericidad de Bartlett es significativa ($\chi^2=843.175$; $p=6.9z703 \times 10^{96}$ con 153 gl.), las cuales apoyan la evidencia de correlaciones altas entre las variables y además indican que los datos muestrales disponibles son adecuados para el uso del análisis de factores. Una vez demostrada la adecuación de la muestra, se procedió a determinar los factores críticos o determinantes de la calidad del servicio. Para este fin, se seleccionó como método de extracción el de componentes principales y como método de rotación, el VARIMAX.

Los resultados revelan la existencia de tres dimensiones (factores) que logran explicar el 57.62% de la variabilidad de los datos, de la cual un 20.26% corresponde a la primer dimensión, 18.75% a la segunda dimensión y, finalmente, el 18.61% a la tercera dimensión.

Analizando la matriz de la Tabla 4, en donde se presenta la matriz rotada de las dimensiones o factores que determinan la calidad del servicio en la cafetería, se observa que la dimensión 1 está asociada a los ítems 15, 18, 16, 11 y 14 de la escala del instrumento (encuesta), y está, por tanto, vinculada con la temperatura, olor, nivel de ruido, comodidad e iluminación de la infraestructura o instalaciones físicas de la cafetería. Por su parte, en la dimensión 2 se pueden agrupar los ítems 4, 13, 6, 17, 9, 12 y 10, referentes a la seguridad y confianza que tienen los estudiantes de recibir alimentos y bebidas con la temperatura y presentación (estética) deseadas, la rapidez e higiene del personal que atiende, así como, a la decoración y limpieza del mobiliario y equipo. Finalmente, la dimensión 3 está compuesta por los ítems 3, 2, 1, 5, 8 y 7, concernientes al sabor, calidad, variedad, cantidad de los alimentos y bebidas y la relación que tienen con su precio.

Tabla 4. Matriz rotada de dimensiones

Dimensión	Ítem	Carga factorial de la dimensión		
		1	2	3
Infraestructura	15	0.784		
	18	0.771		
	16	0.699		
	11	0.653		
	14	0.543		
Fiabilidad	4		0.777	
	13		0.664	
	6		0.598	
	17		0.559	
	9		0.536	
	12		0.530	
	10		0.506	
Alimentos y bebidas	3			.802
	2			.780
	1			.700
	5			.566
	8			.504
	7			.496

Fuente: Elaboración propia con software SPSS

CONCLUSIONES

La percepción de la calidad del servicio de la Cafetería del Instituto Tecnológico de Veracruz fue posible medirla con el desarrollo de un instrumento basado en la metodología SERVPERF y adaptado al tipo de empresa de servicio y su contexto.

El instrumento de medición propuesto obtuvo una confiabilidad de excelente de acuerdo con el cálculo del coeficiente Alfa de Cronbach y mediante los indicadores del grado de asociación de las variables como son las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de esfericidad de Bartlett, derivando en los siguientes resultados: las características de infraestructura en las que los clientes depositan un mayor peso o carga son la temperatura y el color. Actualmente la cafetería cuenta con tres equipos de aire acondicionado, de los cuales, solo funciona uno, lo que confirma el valor que los clientes le dan a este atributo. Por su parte, la deficiente ventilación del edificio hace que el olor sea muy fuerte, situación que también puede impactar negativamente en la evaluación del servicio. En consecuencia, la cafetería tiene que poner especial atención en el mantenimiento de sus equipos de aire acondicionado, así como, considerar la compra de un equipo de extracción de aire para atender el problema de concentración de olor, de tal suerte que los estudiantes perciban una mejor calidad en el servicio. Respecto a la característica fiabilidad, se identifica que se le otorga una mayor ponderación a atributos como la calidad, sabor, temperatura y presentación de los alimentos y bebidas, por tanto, no se deben descuidar estos aspectos para que la calidad se mantenga en un nivel positivo que garantice la satisfacción de los clientes.

El instrumento desarrollado y propuesto puede ser utilizado para evaluar la percepción de la calidad del servicio en otras cafeterías circunscritas en entidades de educación superior, previa modificación de ítems de acuerdo al giro y/o requerimientos del concesionario.

La experiencia observada demuestra que, utilizando los medios digitales, se reduce considerablemente el tiempo que se emplea en administrar las encuestas, ventaja que puede aprovecharse en instituciones con mayor población estudiantil o cuando se requiera una mayor precisión en el estudio. Ofrece además la posibilidad de seguimiento en línea y la integración de la información a una hoja de cálculo en tiempo real para su posterior análisis.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Matsumoto Nishizawa, «Desarrollo del modelo servqual para la medición de la calidad del servicio en la empresa de publicidad Ayuda Experto,» *Perspectivas*, n° 34, pp. 181-209, 2014.

[2] E. Reboloso Pacheco, C. Salvador Ferrer, B. Fernández Ramírez y P. Cantón Andrés, «Análisis y ampliación del SERVQUAL en los servicios universitarios,» *Revista de Psicología del Trabajo y las Organizaciones*, pp. 355-373, 2004.

[3] E. J. Duque Oliva, «Revisión del concepto de calidad del servicio y sus modelos de medición,» *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, vol. 15, n° 25, pp. 64-80, 2005.

[4] A. Mejías Acosta, D. Villegas y N. Maneiro, «Factores determinantes de la calidad de los servicios bancarios en un campus universitario venezolano,» *Investigación y Ciencia*, n° 45, pp. 50-55, 2009.

[5] A. P. De la Hoz Correa, «Propuesta de aplicación de la escala SERVQUAL en el sector salud de Medellín,» *CES Salud Pública*, pp. 107-116, 2014.

[6] J. G. Vargas Hernández, M. G. Zazueta y F. E. Guerra García, «La calidad en el servicio en una empresa local de pizza en los mochis Sinaloa,» *Revista EAN*, n° 68, pp. 24-41, 2010.

[7] C. E. Carlos Ornelas, Y. Montelongo Cortés y M. d. R. Nájera Gallardo, «La Calidad del Servicio de un Centro de Información,» *Conciencia Tecnológica*, n° 40, pp. 5-9, 2010.

[8] J. Vera M. y A. Trujillo L., «El Papel de la Calidad del Servicio del Restaurante como Antecedente de la Lealtad del Cliente,» *Panorama Socioeconómico*, vol. 27, n° 38, pp. 16-30, 2009.

[9] S. E. Maldonado Radillo, A. M. Guillén Jiménez y R. E. Carranza Prieto, «FACTORES DETERMINANTES DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE UNA CAFETERÍA EN EL CAMPUS DE UNA UNIVERSIDAD PÚBLICA,» *REVISTA INTERNACIONAL ADMINISTRACIÓN & FINANZAS*, vol. 6, pp. 109-118, 2013.

[10] E. M. Sanmiguel Jaimes, M. X. Rivera Franco, N. O. Mancilla Medina y H. Ballesteros Monsalve, «Medición de la calidad percibida en el servicio mediante la herramienta SERVQUAL en tiendas de café en Santander, Colombia,» *Criterio Libre*, vol. 13, n° 23, pp. 145-164, 2015.

[11] J. Varela Mallou, R. Prat Santaolària, C. Voces López y A. Boubeta Rial, «Una nueva escala para la evaluación de la calidad de los servicios de hostelería,» *Psicothema*, vol. 18, n° 1, pp. 135-142, 2006.

[12] D. George y P. Mallery, *IBM SPSS Statistics 23 Step by Step A Simple Guide and Reference*, New York: Routledge Taylor & Francis, 2016.

AGRADECIMIENTOS

Se externa el más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca académica otorgada para la realización de nuestros estudios de maestría en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla.

Anexo 1. Encuesta

Género	
Femenino	Masculino

Tipo de usuario			
Estudiante	Docente	Administrativo	Otro

Veces que acude a la cafetería por semana			
1-2 veces	3-4 veces	5-6 veces	Más de 6 veces

En relación al servicio de la cafetería, marca con una X la respuesta que considere más conveniente

Alimentos y bebidas	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
1.- La variedad de alimentos y bebidas que se ofrecen es					
2.- La calidad de los alimentos y bebidas es					
3.- El sabor de los alimentos y bebidas es					
4.- La temperatura de los alimentos y bebidas es					
5.- La cantidad de los alimentos y bebidas que se sirve es					
6.- La presentación del alimento que se sirve es					
7.- La relación entre la calidad de los alimentos y bebidas con el precio es					
Fiabilidad	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
8.- La amabilidad del personal que lo atiende es					
9.- La rapidez del servicio es					
10.- La higiene del personal que lo atiende es					
Infraestructura	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
11.- La comodidad y ambiente de la cafetería es					
12.- La decoración y mobiliario de la cafetería es					
13.- La limpieza de la cafetería es					
14.- La iluminación de la cafetería es					
15.- La temperatura de la cafetería es					
16.- El nivel del ruido de la cafetería es					
17.- La limpieza y equipamiento de los lavabos es					
18.- El olor dentro de la cafetería es					



Mecánica
de
Materiales

Ingeniantes

Modelo de enfriamiento en el travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de enfriamiento de Newton



Colaboración

Adolfo Manuel Morales Tassinari; Raúl Fuentes García; Marcos Manuel Azcaray Rivera, Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez

RESUMEN: El presente estudio tiene como propósito obtener el comportamiento de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, mediante una prueba de enfriamiento de Newton. El método de prueba consiste en calentar 12 probetas cúbicas con dimensión de 50 ± 0.5 mm a una temperatura de 60 °C durante 16 horas, después medir la temperatura superficial de las probetas cada 20 min hasta su equilibrio termodinámico, finalmente dejar transcurrir el tiempo hasta completar un ciclo de 24 horas. Se realizan 10 ciclos de prueba para completar la prueba de enfriamiento de Newton. El resultado obtenido en este estudio es que el travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera tiene una constante de enfriamiento de -0.03565 ; además, el modelo de enfriamiento obtenido satisface en un 99.11% con los datos experimentales. Los resultados muestran que el travertino tipo Dorado Tepexi tiene una capacidad de llegar al equilibrio termodinámico en aproximadamente 140 minutos; por lo que, este es el tiempo que tarda para disipar el calor.

PALABRAS CLAVE: Constante de enfriamiento, dorado tepexi, modelo de enfriamiento, prueba de enfriamiento de Newton, travertino.

ABSTRACT: This study has a purpose to obtain the cooling behavior of the travertine type Dorado Tepexi extracted from the lower bench of the quarry located in San Juan Ixcaquixtla, Puebla, Mexico, through a Newton Cooling test. The test method consist of heating 12 cubic specimens with a size of 50 ± 0.5 mm at a temperature of 60 °C for 16 hours, then measuring the surface temperature of the specimens every 20 min until their thermodynamic equilibrium, finally allowing time to complete a 24 hour cycle. 10 test cycles were performed to complete the Newton cooling test. The result obtained in this study is that the travertine type Dorado Tepexi extracted from the lower bank of the quarry has a cooling constant of -0.03565 ; in addition, the cooling model obtained satisfies 99.11% with the experimental data. The results show that the travertine type Dorado Tepexi has a capacity to reach the thermodynamic equilibrium in approximately 140 minutes; therefore, this is the time for dissipate the heat.

KEYWORDS: Constant cooling, cooling model, dorado tepexi, Newton cooling test, travertine.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de materiales pétreos es un campo de conocimiento interdisciplinar que abarca el estudio de distintas propiedades; de esta forma, al conocer las propiedades de los materiales pétreos se puede mejorar los procesos de fabricación y determinar sus diferentes usos.

En la Ciudad de San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, existe una cantera de travertino tipo Dorado Tepexi que es una roca de color dorado claro y que al ser pulida presenta gran brillo; en la Figura 1, se muestra una fotografía del travertino tipo Dorado Tepexi:



Figura 1. Travertino tipo Dorado Tepexi.

En esta cantera se han realizado diversos estudios de caracterización para conocer las propiedades del travertino tipo Dorado Tepexi. De esta forma, se ha obtenido un coeficiente de absorción de 0.91% y una densidad de 2624 kg/m³ [1]; además, una resistencia a la compresión de 66 MPa [2]. También, se han realizado estudios degradativos en los que mediante cristalización de sales de cloruro de sodio se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del 0.80% [3] y un porcentaje de aumento en su rugosidad del 85.40% [4]; mientras que, mediante cristalización de sales de sulfato de sodio se obtuvo un porcentaje de pérdida de peso del 4.71% [5] y un porcentaje de aumento en su rugosidad del 155.93% [6].

La formulación de un modelo matemático implica identificar las variables causantes del cambio de un sistema [7]; es por esto que, de los fenómenos que pueden modelarse mediante ecuaciones diferenciales, es sin duda, el cambio de temperatura que experimenta cualquier cuerpo al estar en un medio ambiente que este a una temperatura diferente del primero [8].

Isaac Newton observó que al calentar al rojo un bloque de hierro, y tras retirarlo del fuego, el bloque se enfriaba más rápidamente cuando estaba muy caliente y más lentamente cuando su temperatura se acercaba a la temperatura del aire; por lo que, sus observaciones dieron lugar a lo que se conoce como Ley de Enfriamiento de Newton [9].

La Ley de Enfriamiento de Newton establece que la temperatura de un cuerpo cambia a una velocidad que es proporcional a la diferencia de las temperaturas entre el medio externo y el cuerpo [10]; de esta manera, su ecuación diferencial está dada por la Ec. (1):

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_m) \quad \text{Ec. (1)}$$

Al resolver la Ec. (1), se obtiene la Ecuación de Enfriamiento de Newton que establece que la temperatura de un objeto calentado disminuye de manera exponencial con el tiempo, hacia la temperatura del medio que lo rodea [11], dada por la Ec. (2):

$$T(t) = T_m + (T_o - T_m)e^{kt} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde t es el tiempo, T_o es la temperatura inicial del cuerpo, T_m es la temperatura ambiente y k es el coeficiente de enfriamiento. Así, la Ec. (2) describe la evolución temporal del sistema hacia el estado de equilibrio termodinámico [12].

El presente estudio tiene como finalidad realizar una prueba de enfriamiento de Newton para determinar el coeficiente de enfriamiento y obtener el modelo de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México. En este sentido, la importancia de este estudio radica en que al determinar el modelo de enfriamiento de este material permite conocer el comportamiento ante el cambio de temperatura que este material presente.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio de Pruebas de Materiales del Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez. Además, la empresa Industrias del Travertino S.A., procesó las probetas de travertino tipo Dorado Tepexi, seleccionadas de acuerdo al color característico dorado claro y cuya dimensión fuera de 50±0.5 mm en cada cara.

Los equipos empleados para este estudio fueron una pulidora marca MTI KJ GROUP modelo UNIPOL-820, un horno de secado marca MEMMERT modelo UP 500, una báscula digital marca METTLER TOLEDO modelo PB3002-S DELTARANGE, una cámara termográfica marca FLIR y un vernier análogo marca MITUTOYO.

Preparación de las Probetas.

Las 12 probetas se lijaron y pulieron en la pulidora para eliminar el exceso de rugosidad superficial proveniente del proceso de corte. Para el lijado se utilizaron lijas con tamaño de grano 240; mientras que, para el pulido se utilizaron lijas con tamaño de grano 600. En la Figura 2, se muestra una fotografía del lijado y pulido de las probetas:



Figura 2. Lijado y pulido de las probetas.

Para que las 12 probetas se identificaran durante la prueba de enfriamiento se les asignaron números; en la Figura 3, se muestra una fotografía de las 12 probetas numeradas:



Figura 3. Probetas con número de identificación.

Secado Inicial de las Probetas.

Para iniciar la prueba de enfriamiento, se precalentó el horno de secado a una temperatura de 60 °C; después, se introdujeron las 12 probetas dentro del horno precalentado para que fueran secadas a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 48 horas. En la Figura 4, se muestra una fotografía del secado de las 12 probetas:



Figura 4. Secado de las 12 probetas.

Para garantizar que las 12 probetas estuvieran secas, se pesaron con una báscula digital en la hora 46, 47 y 48 a temperatura ambiente; como en las tres horas las probetas tuvieron el mismo peso, entonces en la hora 48 las probetas estaban en condición seca. En la Figura 5, se muestra una fotografía del peso seco de la probeta PA01:

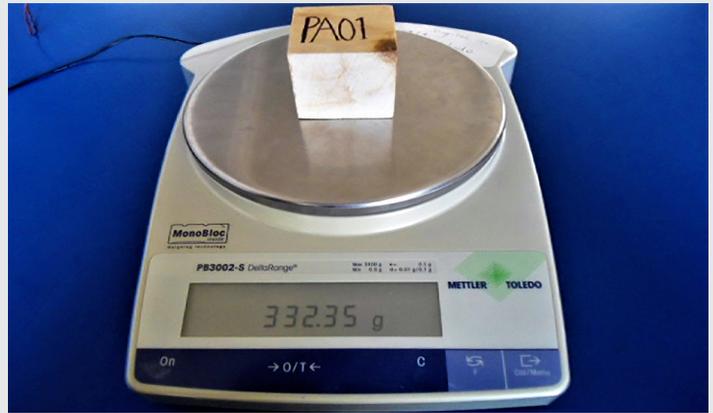


Figura 5. Peso seco de la probeta PA01.

Prueba de Enfriamiento de Newton.

Después, se midió la temperatura superficial de cada probeta con la cámara termográfica; en la Figura. 6, se muestra la fotografía de la temperatura de la probeta PA01 en el ciclo 1 a los 20 min:

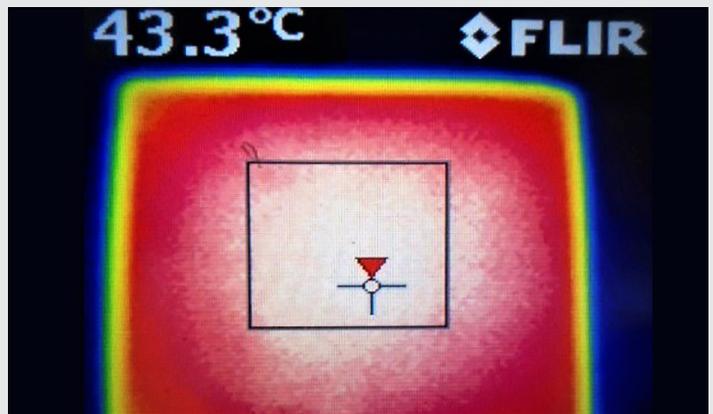


Figura 6. Temperatura de probeta PA01 a los 20 min.

Después de 20 min, se volvieron a medir las temperaturas superficiales de las 12 probetas; por lo que, en la Figura. 7, se muestra la temperatura superficial de la probeta PA01 del ciclo 1 a los 40 min.

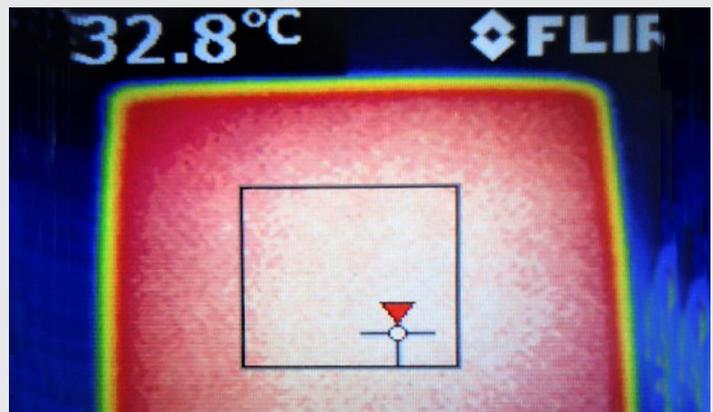


Figura 7. Temperatura de probeta PA01 a los 40 min.

En la Figura 8, se muestra la temperatura superficial de la probeta PA01 del ciclo 1 a los 120 min:

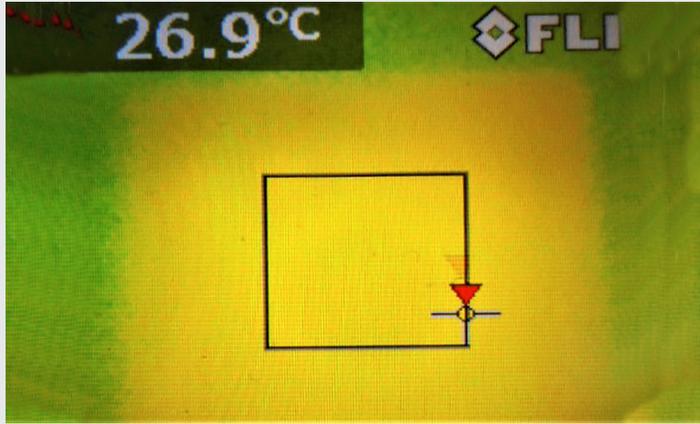


Figura 8. Temperatura de probeta PA01 a los 120 min.

En la Figura 9, se muestra la gráfica de las temperaturas promedio de los 10 ciclos:

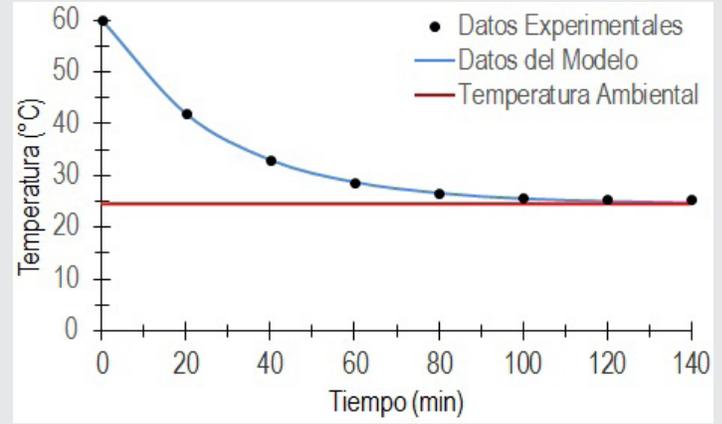


Figura 9. Gráfica de temperaturas promedio.

Después de obtener las temperaturas superficiales de las 12 probetas, se dejaron a temperatura ambiente hasta completar un ciclo de 24 horas. Cabe hacer mención que, todas las temperaturas superficiales de las probetas se obtuvieron a temperatura ambiente.

Repetición de Ciclos de la Prueba.

El ciclo de la prueba de enfriamiento se repitió calentando las 12 probetas en el horno a una temperatura de 60 ± 2 °C durante 16 horas, después se midieron las temperaturas superficiales cada 20 min hasta llegar a su equilibrio termodinámico, finalmente se dejaron las probetas a temperatura ambiente hasta completar las 24 horas. La prueba de enfriamiento se dio por terminada cuando se completaron 10 ciclos.

RESULTADOS

En Tabla 1, se muestra el concentrado de las temperaturas promedio obtenidas de las prueba de enfriamiento de las 12 probetas en los 10 ciclos:

Tabla 1. Concentrado de las temperaturas promedio.

Número de Ciclos	Temperaturas promedio (°C)						
	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min	140 min
1	43.1	32.8	29.3	27.4	26.7	26.5	26.8
2	40.9	33.7	29.6	27.9	27.3	27.0	27.0
3	42.7	33.7	29.8	28.4	27.3	26.9	26.9
4	41.3	34.0	30.7	28.2	27.2	27.8	27.2
5	42.5	33.0	28.2	25.7	24.5	23.9	23.6
6	40.0	31.4	27.6	26.3	25.7	25.7	25.5
7	41.9	34.0	29.9	28.1	27.1	26.7	26.4
8	41.1	32.3	27.9	27.0	24.8	24.4	24.0
9	40.7	32.3	27.9	25.7	24.9	24.8	24.7
10	43.1	32.8	29.3	27.4	26.7	26.5	26.8
Promedio	41.9	32.9	28.5	26.7	25.7	25.5	25.3

Ahora, mediante la condición inicial $T(t=0)=60$ °C y el promedio de la temperatura del medio ambiente $T_m=24.5$ °C, se hace una sustitución de estas temperaturas en la Ec. (2), para obtener la Ec. (3):

$$T_0 = 24.5 + 35.5e^{kt} \quad \text{Ec. (3)}$$

De esta manera, se sustituye la condición de temperatura $T(t=20 \text{ min})=41.9$ °C dentro de la Ec. (3), para obtener la constante k:

$$T_0 = 24.5 + 35.5e^{kt}$$

$$41.9 = 24.5 + 35.5e^{k(20)}$$

$$\frac{41.9 - 24.5}{35.5} = e^{20k}$$

$$0.490140845 = e^{20k}$$

$$\ln(0.490140845) = \ln(e^{20k})$$

$$-0.71306249 = 20k$$

$$k = -0.03565$$

Por lo que, el coeficiente de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi extraído de la cantera de San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, es de -0.03565. Para obtener la Ecuación de Enfriamiento del Travertino tipo Dorado Tepexi se sustituye el coeficiente de enfriamiento en la Ec. (3), obteniéndose la Ec. (4):

$$T_{(t)} = 35.5e^{-0.03565t} + 24.5 \quad \text{Ec. (4)}$$

Una vez obtenida la ecuación de enfriamiento del travertino tipo Dorado Tepexi, se realizó una comparación entre el promedio de las temperaturas obtenidas en el experimento y las temperaturas dadas por la Ec. 4.

En la Tabla 2, se observan los resultados de este análisis:

Tabla 2. Resultados comparativos.

Tiempo (min)	Temperatura del Experimento (°C)	Temperatura del Modelo (°C)	Porcentaje de Error (%)
0	60.0	60.0	0.00
20	41.9	41.9	0.00
40	32.9	33.0	0.92
60	28.5	28.7	0.70
80	26.7	26.6	0.37
100	25.7	25.5	0.78
120	25.5	25.0	1.96
140	25.3	24.7	2.37
Promedio			0.89

En la Tabla 2, se muestra que el error promedio es de 0.89 %; por lo que, la Ec. (4) tiene un ajusté del 99.11% a las temperaturas del experimento.

Ahora en la Figura 10, se observan las gráficas de las temperaturas superficiales obtenidas experimentalmente y las temperaturas superficiales obtenidas del modelo de enfriamiento dado por la Ec. (4):



Figura 10. Gráficas comparativas de los datos experimentales y el modelo de enfriamiento

Como se observa en la Figura 10, la gráfica de los datos del modelo tiene gran similitud con los datos experimentales; por lo que, el modelo de enfriamiento obtenido predice adecuadamente los datos obtenidos por el experimento.

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente estudio respecto del travertino tipo Dorado Tepexi extraído del banco inferior de la cantera ubicada en San Juan Ixcaquixtla, Puebla, México, son:

- El coeficiente de enfriamiento de este material es de -0.03565; además, el modelo de enfriamiento se da mediante la ecuación:

$$T_{(t)} = 35.5e^{-0.03565t} + 24.5 \quad \text{Ec. (4)}$$

-El modelo de enfriamiento obtenido cumple satisfactoriamente con los datos obtenidos por el experimento, ya que existe un porcentaje promedio de error del 0.89% entre las temperaturas obtenidas experimentalmente y las temperaturas obtenidas por el modelo; de esta manera, se concluye que la función obtenida describe en un 99.11% el comportamiento de enfriamiento.

-Los investigadores interesados en continuar con este tipo de investigaciones podrían estudiar el comportamiento de calentamiento de este material mediante una prueba de enfriamiento; además, se pueden determinar algunas propiedades como la resistencia a la flexión, la resistencia a la abrasión y el índice de fricción.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Morales, A., Flores, S. Y Hernández, J. (2015). *Determinación de las propiedades de absorción y densidad de la roca caliza travertino tipo dorado tepexi. Ingeniantes, 1(1), 08-14.*

[2] Morales, A., Cruz, P., Azcaray, M. Y Servín, A. (2016). *Determinación de la resistencia a la compresión de la roca caliza travertino tipo dorado tepexi. En Academia Journal (Ed.), Memoria del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2016, Vol.8, No. 5 (pp. 4076-4081). Celaya, Guanajuato, México: Autor.*

[3] Morales, A., Flores, S., Luna, E., Hernández, J. Y Servín, A. (2016). *Estudio comparativo de la alteración del peso en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio. Revista Electrónica en Ingeniería Mecánica ITQU@NTUM, (28), 1-17.*

[4] Morales, A., Velasco, M. Y Hernández, J. (2016). *Estudio comparativo de la alteración de la rugosidad en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante una prueba de cristalización de sales por cloruro de sodio. Ingeniantes, 2(1), 36-43.*

[5] Morales, A., Guevara, J., Martínez, C., Servín, A. Y Hernández, J. (2016). *Estudio comparativo de la alteración del peso en la roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. Revista Electrónica en Ingeniería Mecánica ITQU@NTUM, (29), 24-41.*

[6] Morales, A., Velasco, M., Cruz, P. Y Hernández, J. (2017). *Comparación en la rugosidad de la*

roca caliza travertino tipo dorado tepexi mediante prueba de cristalización de sales por sulfato de sodio. En Instituto Politécnico Nacional (Ed.), *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2017)*, (pp. 1-9). Zacatenco, Ciudad de México, México: Autor.

[7] García, E. Y Reich, D. (2015). *Ecuaciones diferenciales: Una nueva visión*. México, D.F.: Patria.

[8] Jiménez Zamudio J. J. Y López García, J. (2005) *Métodos analíticos para ecuaciones diferenciales ordinarias*. Ciudad Universitaria, México: FES Acatlán, UNAM.

[9] Aguilar Villa, Gloria Y Clavero García, Carmelo. (2014). *Matemáticas III: Ecuaciones diferenciales, series de Fourier y aplicaciones*. Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

[10] Gómez, J., Razo, J. Y Guerrero, V. (2014). *Ley de enfriamiento de Newton de orden fraccionario*. *Investigación y Ciencia*, (61), 12-18.

[11] Sullivan, M. (2013) *Algebra y trigonometría*. México: Pearson Educación.

[12] Barragán, D. (2009). *Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton*. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 88-93.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Industrias del Travertino S.A., por procesar las probetas cúbicas de Travertino tipo Dorado Tepexi. Además, agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por prestar sus instalaciones y equipo para la realización de la prueba de enfriamiento.



Ciencias
de la
Computación

Ingeniantes

Control de visión inteligente por lógica difusa y RNA para el seguimiento de un objeto aplicado a una estructura robótica de 6 GDL



Colaboración

Mariana N. Ibarra-Bonilla; Iván Reyes-Castillo; Fernando Sánchez-Texis, Instituto Tecnológico Superior de Atlixco; Fernando J. Quiñones-Novelo, INTESC: Electronics & Embedded

RESUMEN: Este artículo presenta el desarrollo de un control de visión por computadora, el cual incorpora técnicas de inteligencia artificial: lógica difusa y redes neuronales artificiales (RNA) para ejecutar el seguimiento autónomo de la posición de un objeto de color específico. La información visual de la posición y color del objeto se obtienen por medio de una cámara web montada en un brazo robótico. El movimiento de cada articulación del brazo robot es controlado por lógica difusa y una RNA perceptrón-multicapa. La RNA es entrenada para clasificar y reconocer el color del objeto. Estos algoritmos son desarrollados utilizando las cajas de herramientas de lógica difusa, redes neuronales y procesamiento de imágenes de Matlab® v8.5. Este trabajo responde a las aplicaciones de inteligencia artificial realizadas para un brazo robótico servo-controlado de 6 grados de libertad (GDL) diseñado en CATIA v5.0 y manufacturado dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco.

PALABRAS CLAVE: control difuso, red neuronal artificial, visión, brazo robótico.

ABSTRACT: This paper presents the development of a vision computer control, which incorporates artificial intelligence techniques: fuzzy logic and artificial neural networks (ANN) to performance the autonomous tracking of the position of a specific color object. The visual information of the position and color of the object are obtained through a web-cam mounted on a robotic arm. The movement of each articulation of the robotic arm is controlled using fuzzy logic and a perceptron-multi-layer ANN. The ANN is trained to classify and recognize the color object. These algorithms are developed using the fuzzy logic, neural networks and image processing toolboxes of Matlab® v8.5. This work responds to artificial intelligence applications made for a 6 degree of freedom (DOF) servo-controlled robotic arm designed using CATIA v5.0 and manufactured using the facilities within the Instituto Tecnológico Superior de Atlixco.

KEYWORDS: fuzzy control, artificial neural network, vision, arm-robot.

INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de inteligencia artificial, como la lógica difusa y las redes neuronales artificiales, están creciendo significativamente en las áreas de automatización, robótica y control. Uno de los principales beneficios de la lógica difusa, es su capacidad de incorporar el conocimiento experto de un ser humano en lo referente a cómo controlar un sistema, lo que permite diseñar controladores libres de un modelo matemático. Así que el control difuso puede emplearse para controlar plantas no lineales o cualquier sistema cuyo modelo matemático pudiera ser complejo [1].

Por otra parte, las redes neuronales artificiales (RNA) incorporan la capacidad de aprender, y al igual que los humanos, pueden realizar tareas de comparación de patrones [2]. Por ello, las redes neuronales y los sistemas de control difuso son excelentes para el desarrollo de sistemas artificiales, porque pueden realizar el mismo tipo de tratamiento de la información como lo hace el cerebro humano.

Además de las técnicas de inteligencia artificial, actualmente, múltiples aplicaciones robóticas han incorporado información visual a sus sistemas de posicionamiento [3, 4, 5]; por ejemplo en la operación de robots industriales, un sistema de visión artificial puede hacer que un robot manipulador sea mucho más versátil, permitiéndole tratar de forma adecuada las variaciones en la posición y orientación de las piezas que deba manipular. Los sistemas de visión por computadora utilizan imágenes y video para detectar, clasificar y seguir eventos, y de esta manera, interpretar escenas del mundo real. Las capacidades actuales de cómputo, ya permiten el uso frecuente de técnicas de visión, como elemento de medición para cerrar el lazo de control.

En robótica, los sistemas de inferencia difusos han sido implementados en diversas aplicaciones, tales como control de posición de servomotores [6, 7] y control de brazos robot [8, 9]. Los sistemas de control difuso se basan en la toma de decisiones en forma de razonamiento aproximado, de acuerdo con la información contenida en una base de conocimiento. Las variables del sistema son representadas en forma de conjuntos difusos, definidos en base a funciones de membresía. Las aplicaciones del control difuso que incorporan información visual, se encuentran principalmente en la navegación de vehículos o robots autónomos. Por ejemplo, Taryudi y Wang en [10] presentan un experimento que incorpora un control neuro-difuso para comandar los movimientos de un brazo robot de 6GDL (grados de libertad). En el experimento, un objeto de color es colocado dentro del área de alcance o manipulación del brazo. El propósito del experimento es tomar dicho objeto con el brazo y trasladarlo hacia una nueva posición. La información de la posición del objeto, es obtenida mediante dos cámaras de video idénticas. Las cámaras fueron colocadas en una configuración bifocal, con el objetivo de capturar la escena completa, la del brazo y el objeto de color. Con esta información la red neuronal, calcula la posición del objeto con respecto de la posición del brazo y controla los movimientos de este último. A diferencia del anterior, en el presente trabajo se propone el uso de una sola cámara, para realizar el seguimiento de un objeto de color en tiempo real.

Ligutan, et al. en [11] describen un sistema difuso para el control de movimiento de un brazo robot de 6GDL. El objetivo de este trabajo, es similar al anterior en lo que respecta a la tarea que debe realizar el brazo. Sin embargo, en dicho trabajo, se emplea una cámara Kinect® y un sensor inercial MP6050 para obtener las imágenes, coordenadas y datos de entrada. La presente propuesta se diferencia

de dicho trabajo, por incorporar una técnica adicional de inteligencia artificial: RNA.

Zapata en [12] describe el uso de la lógica difusa para el seguimiento de un objeto de color, que se desplaza dentro de su campo visual, usando un brazo robot de 2GDL y una sola cámara. El seguimiento se realiza mediante la identificación de únicamente dos colores. Para el cálculo de la posición del objeto, el autor emplea técnicas ya conocidas de procesamiento de imágenes. La cámara montada sobre el brazo robot, es desplazada en un espacio bidimensional o plano. El control difuso calcula las posiciones que deben de adoptar las articulaciones del brazo, para mantener al objeto en el centro del campo visual de la cámara. Dicho trabajo tiene similitud con la presente propuesta, no obstante, en este artículo se presenta un control difuso aplicado a un brazo robot de 6GDL y un clasificador de 7 colores, lo que aumenta el grado de complejidad del sistema.

En general, las redes neuronales, como los sistemas de control o de toma de decisiones basados en lógica difusa, son excelentes para desarrollar sistemas que pueden ejecutar el mismo tipo de procesamiento de información que el cerebro humano.

El objetivo del presente trabajo es incorporar técnicas de inteligencia artificial: control difuso y redes neuronales, al control de movimiento de un brazo robot de 6 grados de libertad (GDL). De manera que al visualizar un objeto de color, el robot realice el seguimiento autónomo de dicho objeto, manteniéndolo en el centro del campo visual de la cámara mientras se desplaza. La información visual de la posición y color del objeto, se obtienen por medio de una cámara web, montada sobre el brazo robot.

Adicionalmente los algoritmos desarrollados en este proyecto servirán como una herramienta didáctica para los cursos de Robótica y Control Digital que se imparten actualmente en el plan de estudios de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco. De esta manera, los estudiantes tendrán una visión inmediata de los conceptos teóricos-prácticos involucrados en estos campos de la ingeniería.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño mecánico del brazo robótico incorpora 2 GDL para el hombro y 1GDL para cada articulación restante que conforma el brazo, es decir, el codo, antebrazo, muñeca y soporte de la cámara, completando un total de 6 GDL. Cada GDL es ejecutado por la acción de un servomotor. El diseño CAD del brazo robot, fue realizado en el software CATIA v5 y se presenta en la Figura 1. Dicha figura muestra la distribución de los servomotores y el montaje de la cámara web. Los servomotores del número uno al cinco, son de la marca HITEC-RCD® de 15 Kg-cm de torque, mientras que el servomotor número seis es de la marca TowerPro® de 1.5 Kg-cm de torque. En la construcción de las piezas que conforman la estructura del brazo robot,

se utilizó como materia prima un panel compuesto por dos caras de aluminio y cuerpo interno de PVC espumado de alta densidad. Cada pieza fue manufacturada en una máquina CNC, de la marca Charly-4U, que se encuentra en el Laboratorio de Manufactura, dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco.

La cámara, montada sobre el brazo robot, es un sensor CIF-CMOS de 640 x 480 pixeles de resolución, a 30 cuadros por segundo, con conexión USB. Para el control de movimiento de los seis servomotores, se utilizó la tarjeta electrónica Pololu-Maestro de seis canales con salida PWM. La tarjeta se comunica a un ordenador mediante un puerto CDC-USB a través de comandos AT.

El sistema de control de movimiento y el clasificador de color, han sido desarrollados utilizando las cajas de herramientas de procesamiento de imágenes, redes neuronales y lógica difusa de la plataforma MATLAB. Actualmente, MATLAB está disponible en cualquier universidad o industria, y es usado, entre otras aplicaciones, en el diseño de sistemas de control.



Figura 1. Modelo CAD del brazo robot de 6 GDL.

Metodología para el reconocimiento del color: entrenamiento de la RNA.

Descripción de la RNA.

Una RNA es un modelo computacional, inspirado en la función de las redes neuronales biológicas, el cual está compuesto por elementos de procesamiento (neuronas) y múltiples conexiones entre ellos.

Para esta investigación, se utilizó una RNA tipo perceptrón-multicapa backpropagation para el reconocimiento de siete colores diferentes: rojo, verde, azul, amarillo, cian, magenta y naranja.

El perceptrón es un tipo de red de aprendizaje supervisado, esto significa que la red necesita conocer los valores esperados, t , para cada una de las entradas presentadas, p . De esta manera, el comportamiento de la red está definido por pares entrada-salida de la forma

[p , t]. La arquitectura de la RNA se presenta en la Figura 2 y consiste de dos capas. La capa oculta tiene 10 neuronas y una función de activación sigmoide. La capa de salida tiene 7 neuronas y una función de activación lineal. Las 7 neuronas en la capa de salida representan las siete condiciones de clasificación. De esta manera, la salida está determinada por la siguiente expresión:

$$y = \text{pureline} \{ \mathbf{W}^2 \text{sigmoide} (\mathbf{W}^1 \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2 \} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde, y es el valor de salida de la red, W^1 y W^2 son las matrices de pesos asociadas a las capas 1 y 2, p es el vector de entrada y b^1 y b^2 son los vectores de umbrales asociados a cada capa.

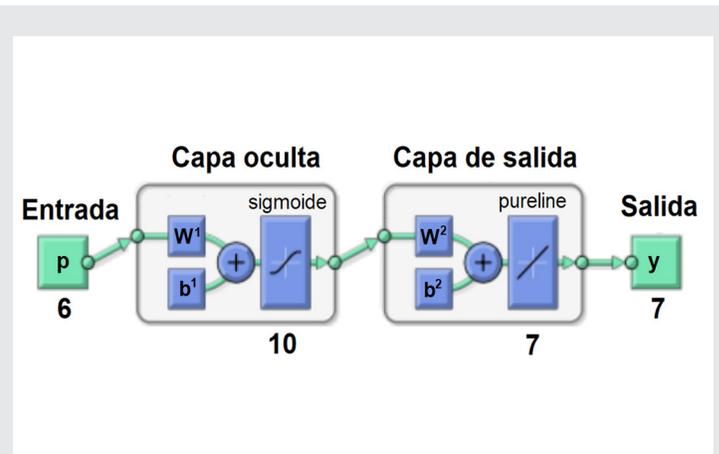


Figura 2. Estructura de la red neuronal para la clasificación de color.

Extracción de características.

La información visual, obtenida de la cámara web (sensor de visión), es importada al entorno de trabajo de MATLAB, usando las funciones de adquisición de imágenes, para formar el vector de entrada a la RNA, p . El vector p está formado por seis características: las tres componentes RGB (del inglés Red, Green, Blue) y las tres componentes HSV (del inglés Hue, Saturation, Value), para cada color. En el modelo RGB, cada color aparece en sus componentes espectrales primarias: rojo, verde y azul, mientras que en HSV cada color aparece en sus componentes: matiz, saturación y brillo.

Para obtener estas características se lleva a cabo una serie de operaciones de pre-procesamiento sobre la señal de video de entrada: la imagen capturada, de 640x480 pixeles, es segmentada a 352x288 pixeles y binarizada. Posteriormente, se eliminan los objetos menores a 30 pixeles y se detecta el contorno exterior de cada objeto detectado. Los pixeles contenidos en cada contorno, representan a cada objeto presente en la imagen, en consecuencia, su posición ya es conocida. La imagen capturada originalmente se descompone, respectivamente, en las componentes RGB y HSV, y se realiza un promedio de los valores contenidos den-

tro de las coordenadas correspondientes a cada contorno. Así el vector de entrada está conformado por:

$$p = [R \ G \ B \ H \ S \ V]^T \quad \text{Ec. (2)}$$

El aprendizaje de la RNA es supervisado, por lo que es necesario establecer previamente los valores deseados (vectores objetivo) para cada conjunto de datos presentes a la entrada. El vector objetivo tiene el mismo número de elementos que neuronas en la capa de salida. Un ejemplo del vector objetivo para el color rojo es:

$$\text{rojo} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad \text{Ec. (3)}$$

Entrenamiento de la RNA.

El propósito general del entrenamiento de una RNA es obtener un conjunto de vectores o matriz de pesos, W, y un conjunto de niveles de umbral de activación b, de tal forma que se minimice el error entre la salida de la red neuronal con el valor deseado del sistema a modelar por la RNA [2]. Los algoritmos de entrenamiento son los encargados de modificar los pesos de cada neurona para identificar a lo largo de una serie de iteraciones, cuál es el patrón que mejor se ajusta a los objetivos. En la caja de herramientas de redes neurales de MATLAB se incluyen diferentes algoritmos de entrenamiento que usan métodos basados en gradiente o Jacobiano [13]. De acuerdo con Hagan, Demuth y Beale en [2] y [13] los algoritmos más rápidos son Levenberg-Marquardt (trainlm) y BFGS Quasi Newton (trainbfg), y para aplicaciones con reconocimiento de patrones, los algoritmos de Gradiente Conjugado Escalado (trainscg) y Retropropagación resistente (trainrp) son las elecciones apropiadas. En esta investigación se propuso utilizar como algoritmos de entrenamiento para la red neuronal backpropagation, los siguientes: trainlm, trainbfg y trainscg.

Para formar los pares entrada/salida para entrenamiento y validación de la RNA, se obtuvieron 5 muestras de 4 tonalidades diferentes por color, así se generaron 20 vectores de entrada, p, por cada color. Estos datos se dividieron en dos sub-conjuntos, el primero para entrenamiento y el segundo para validación. La matriz de entrenamiento está conformada por las componentes R-G-B-H-S-V obtenidas de las tres primeras tonalidades de cada color, y la matriz de validación está compuesta por las componentes de la cuarta tonalidad. De acuerdo con lo anterior, el entrenamiento de la red utiliza la técnica conocida por su nombre en inglés leave-one-subject-out-cross-validation. Este proceso es repetido hasta que los datos de cada tonalidad han sido usados para el conjunto de validación.

Metodología para el seguimiento autónomo del objeto: control difuso.

El principal propósito de la lógica difusa es permitir el uso de conceptos vagos para caracterizar las variables de un sistema usando términos lingüísticos humanos. Esto es posible debido a que, en la teoría de conjuntos difusos, un

elemento no está restringido para pertenecer o no pertenecer a un conjunto. En cambio, un elemento puede tener un grado de pertenencia o membresía intermedio en todo el rango (0, 1). Entonces, un sistema basado en lógica difusa proporciona una metodología formal para representar, manipular e implementar el conocimiento heurístico de un ser humano sobre cómo controlar un sistema [14]. La estructura básica de un sistema difuso, con cinco bloques funcionales, se muestra en la Figura 3. La función de cada bloque es la siguiente:

- La base de reglas, contiene las reglas difusas de tipo IF-THEN.
- La base de datos, define las funciones de membresía de los conjuntos difusos usados en las reglas difusas.
- La unidad de toma de decisiones, ejecuta las operaciones de inferencia sobre las reglas.
- La interface de fusificación, transforma las entradas a grados de membresía dentro de los valores lingüísticos.
- La interface de defusificación, transforma los resultados de la inferencia a los valores de salida.

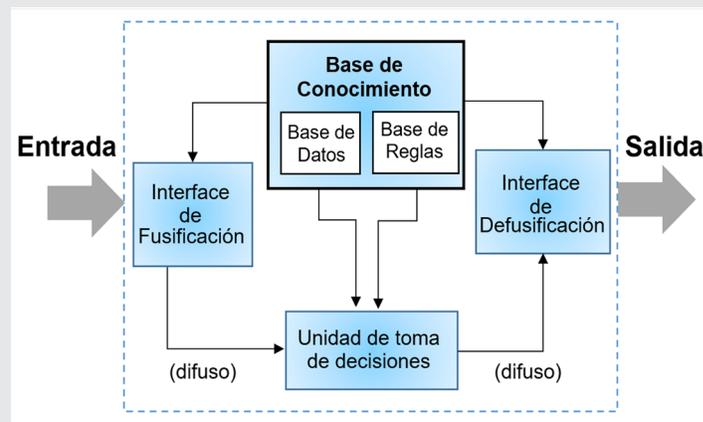


Figura 3. Sistema basado en lógica difusa.

Para este trabajo, el objetivo del controlador difuso es entregar la posición angular de cada servomotor instalado en las articulaciones del brazo robot, tomando como entrada el error en la posición, en coordenadas X-Y, del objeto detectado por la cámara con respecto al centro de la imagen capturada. El esquema del diagrama a bloques del controlador se presenta en la Figura 4, donde el bloque del controlador difuso está compuesto por los elementos presentes en la Figura 3.

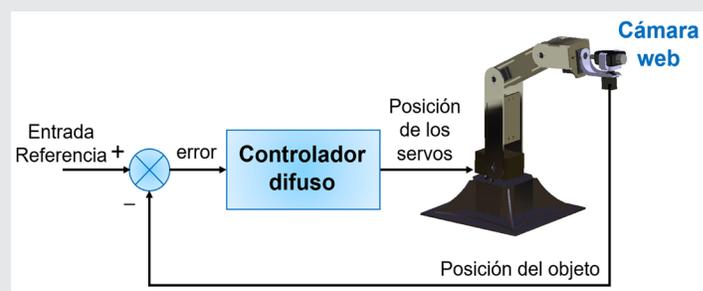


Figura 4. Diagrama a bloques del control de posición difuso.

Definición de entradas y salidas del controlador difuso.

El control difuso requerido para este trabajo es un MIMO, del inglés Multiple-Input-Multiple-Output. Se definen dos variables lingüísticas de entrada: error-X y error-Y, cada una con particiones en 7 funciones de membresía gaussianas etiquetadas como grande-negativo (G-Neg), negativo (Neg), poco-negativo (P-Neg), cero (C), poco-positivo (P-Pos), positivo (Pos) y grande-positivo (G-Pos). La primera entrada error-X corresponde a la diferencia entre el centro de la imagen y el centro del objeto a seguir, medida sobre el eje X de la imagen. La segunda entrada error-Y es similar, pero el error se mide sobre el eje Y. Las funciones de membresía de las variables lingüísticas de la entrada se presentan en la Figura 5.

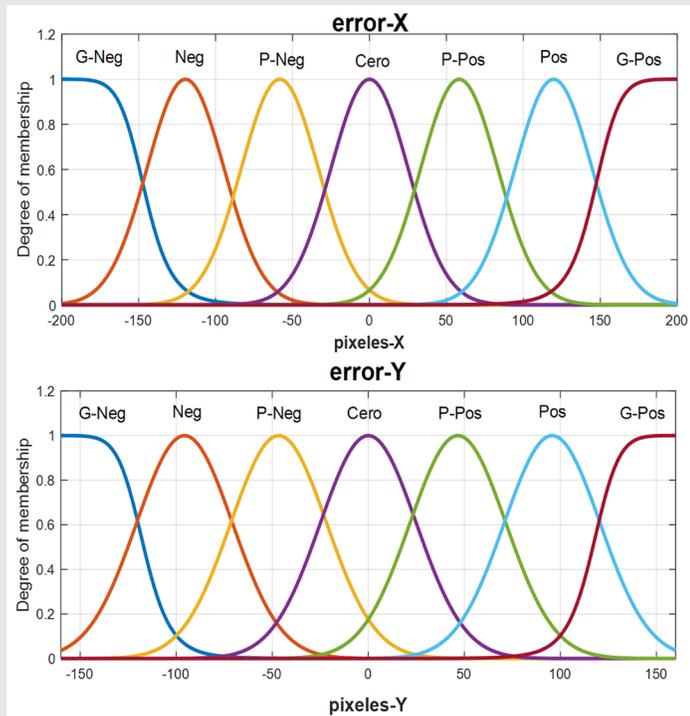


Figura 5. Funciones de membresía de las variables de entrada.

Se definen seis variables lingüísticas para la salida del controlador: servo1-servo6. Cada variable de salida representa a cada uno de los grados de libertad del robot. Para definir los parámetros de las variables de salida fue necesario realizar pruebas para caracterizar los movimientos de cada servomotor. Estos parámetros se definen de acuerdo a la duración del ancho del pulso de la señal de control, PWM (del inglés, Pulse Width Modulation), para el posicionamiento de un servomotor [15], pues la duración del ancho del pulso indica el ángulo de posición del servomotor. En este trabajo, el rango considerado para el ancho de pulso es de 500us - 2500us, lo que permitirá al servomotor moverse entre una posición angular mínima y máxima (0° - 180°). Por ejemplo, el valor 1500us indica la posición central o neutra (90°), cualquier otro valor dentro del rango corresponde a las posiciones intermedias. Un esquema de esta señal se presenta en la Figura 6.

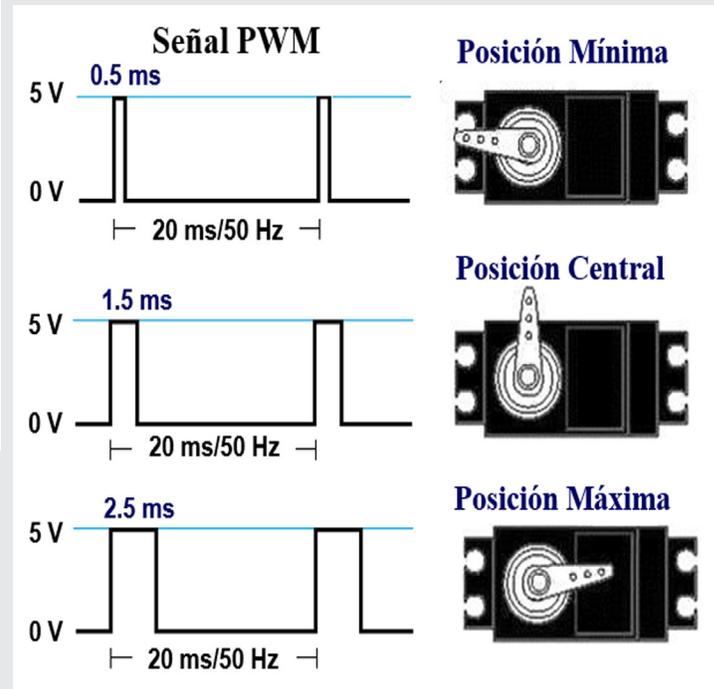


Figura 6. Esquema de la señal PWM para servo control.

Figura 6. Esquema de la señal PWM para servo control. La posición inicial de los servomotores se presenta en la Tabla 1 y es expresada en duración del ancho del pulso en micro segundos us. A partir de estos, se definen los parámetros de las variables de salida como los valores, en us, que se deben sumar o restar al ancho del pulso. De igual manera se definen 7 funciones de membresía para cada variable de salida. La Figura 7 presenta las funciones de membresía definidas para la variable lingüística servo-1.

Tabla 1. Posición Inicial de los Servomotores.

	servos					
	1	2	3	4	5	6
Duración del pulso en us	1500	1550	2200	1500	1440	1500

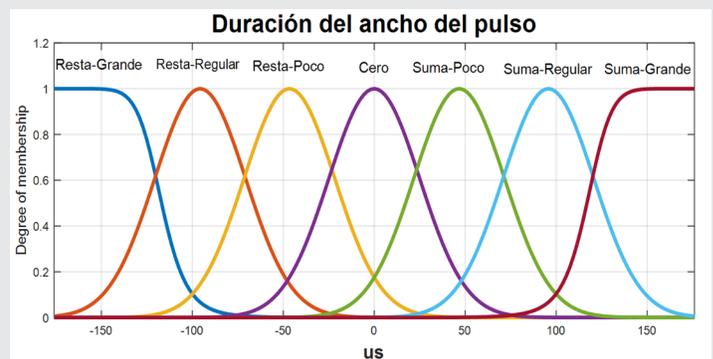


Figura 7. Funciones de membresía de la variable de salida servo-1.

Base de Conocimiento: definición de reglas difusas.

Las reglas de inferencia que conforman la base del conocimiento están definidas como reglas IF (antecedente) THEN (consecuente). Las reglas son propuestas, de tal manera que los giros de los servomotores generen un movimiento en la cámara hacia la misma dirección del desplazamiento del objeto. Como se expuso anteriormente, los movimientos del robot fueron caracterizados y la Tabla 2 presenta un resumen de esta caracterización en cuatro movimientos generales: "subir", "bajar", "izquierda" y "derecha". Para generar cada movimiento de la Tabla 2, se toman como referencia los valores del ancho de pulso de la Tabla 1, y se indica la operación que se debe aplicar sobre dichos valores: sumar y restar; y así posicionar correctamente a la cámara. De acuerdo con esto, un ejemplo de la regla de inferencia para generar un movimiento a la izquierda es: *IF error-X es Neg AND error-Y es Cero THEN servo-1 es Suma-Regular AND servo-6 es Resta-Regular.*

Tabla 2. Caracterización del movimiento de los Servomotores.

	servos					
	1	2	3	4	5	6
Subir		suma	resta	resta	suma	
Bajar		resta	suma	suma	resta	
Izquierda	suma					resta
Derecha	resta					suma

En total se definieron 49 reglas que completan la base de conocimiento del controlador. Los operadores difusos min, max-min y el método por centro de gravedad son usados como los operadores de intersección, regla composicional y método de defusificación, respectivamente.

RESULTADOS

Reconocimiento de color por RNA.

En cada entrenamiento y validación de la RNA se calcularon los valores de rendimiento MSE (Mean Squared Error) para cada algoritmo de entrenamiento, los cuales indican el error mínimo alcanzado. Los resultados promedios del MSE se presentan en la Tabla 3, en donde se indica que el algoritmo Levenberg-Marquardt proporcionó el mejor rendimiento en cuanto a entrenamiento y validación de la red neuronal. Por lo anterior, Levenberg-Marquardt es el algoritmo con el que se entrena la red implementada en este trabajo.

Tabla 3. Comparación del rendimiento de los diferentes algoritmos de entrenamiento.

Algoritmo	Entrenamiento (MSE)	Validación (MSE)
Levenberg-Marquardt	0.0403	0.00063
BFGS Quasi Newton	0.114	0.052
Gradiente Conjugado Escalado	0.0561	0.0398

Para validar el desempeño del reconocimiento de colores, se tomaron 70 imágenes que incluían los diferentes colores, donde cada color en sus diferentes tonali-

dades, se repite en 10 imágenes. La Figura 8a presenta un ejemplo de una de las imágenes capturadas. En la Figura 8b se presenta el resultado del pre-procesamiento, la 8c es el resultado de la clasificación sobre la imagen binarizada y la 8d presenta una máscara de la imagen original con la imagen obtenida para reconocer un color amarillo.

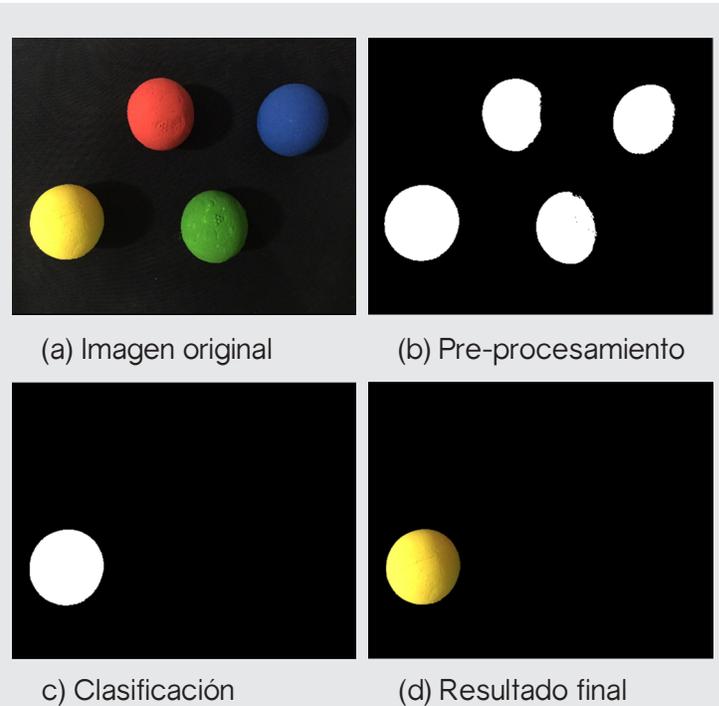


Figura 8. Resultados de la clasificación de la RNA para reconocer un color amarillo.

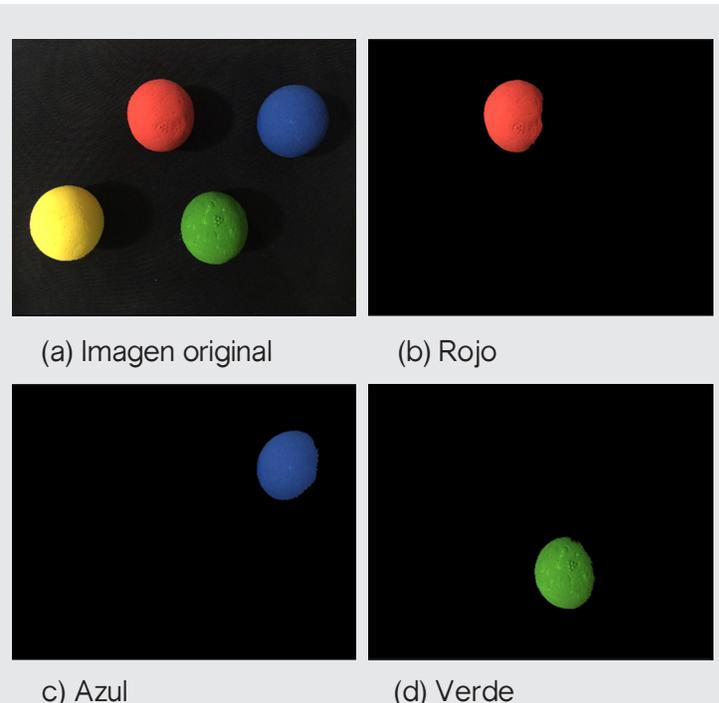


Figura 9. Resultados de la clasificación de los colores rojo, azul y verde.

La Figura 9 presenta los resultados finales del reconocimiento de los demás colores contenidos en la Figura 8a. La Tabla 4 presenta la matriz de confusión que muestra el porcentaje de precisión obtenido durante la validación. El porcentaje general de precisión es de 94.28%.

Tabla 3. Comparación del rendimiento de los diferentes algoritmos de entrenamiento.

	rojo	verde	azul	amarillo	cyan	magenta	naranja
rojo	100	0	0	0	0	0	0
verde	0	90	0	10	0	0	0
azul	0	0	100	0	0	0	0
amarillo	0	0	0	100	0	0	0
cyan	0	0	10	0	90	0	0
magenta	0	0	0	0	0	100	0
naranja	20	0	0	0	0	0	80
94.28%							

Control difuso de seguimiento autónomo.

La Figura 10 presenta la imagen real del brazo robótico y la cámara web en su posición inicial. Es importante mencionar que cuando se trabaja con video, la iluminación es un factor importante a considerar, pues si no se cuenta con buenas condiciones de iluminación los resultados de la clasificación se verán afectados. Para disminuir los efectos de las sombras se decidió realizar las pruebas sobre un fondo de color negro, tal como se muestra en la Figura 10. Para la comunicación entre la PC y el brazo robot y para el control de servos se utilizó el Maestro Servo Controller USB del fabricante Pololu [16].

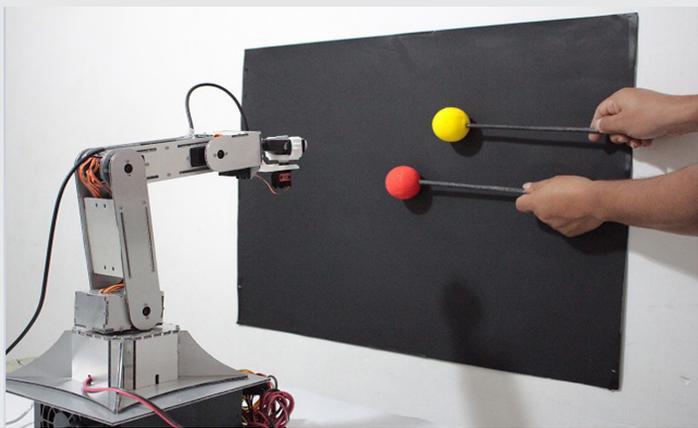


Figura 10. Posición inicial del brazo robot.

El controlador difuso entregó correctamente la posición angular de los servomotores, de tal forma que se cumple el amarre de la posición angular de la cámara con la información visual de la escena detectada. La Figura 11 presenta imágenes del sistema completo funcionando. Se considera el punto inicial el centro de la imagen y el seguimiento es para el objeto de color amarillo. Se observa que la cámara web se mantiene centrada apuntando al objetivo, en este caso al objeto de color amarillo. Esto es debido a que el movimiento de los servos del brazo compensa el desplazamiento del objetivo a través del control difuso implementado.

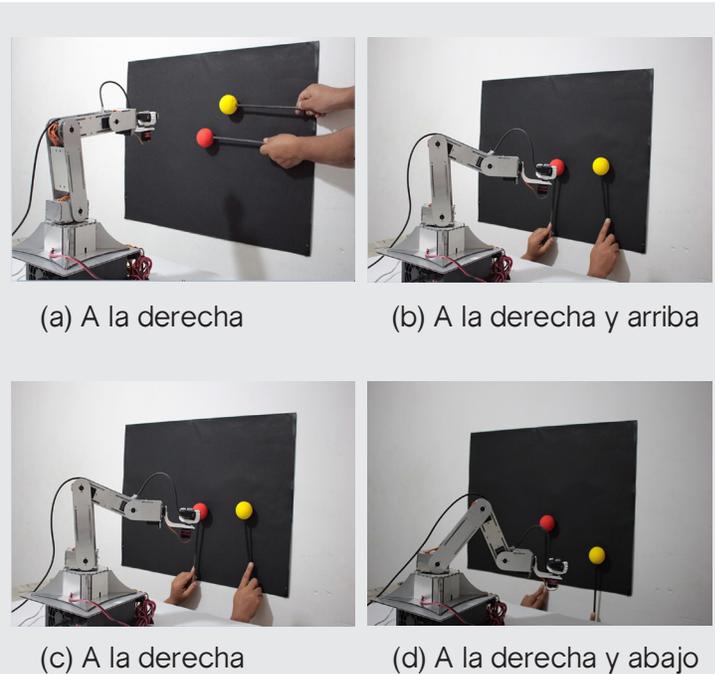


Figura 11. Demostración de los movimientos del brazo robot.

CONCLUSIONES

Se presentó un control de visión por computadora, el cual incorpora técnicas de inteligencia artificial: lógica difusa y redes neuronales artificiales, para ejecutar el seguimiento autónomo de la posición de un objeto de color específico. El sistema está desarrollado en Matlab® versión 8.5 y fue diseñado como una aplicación didáctica de un brazo robot de 6 GDL.

El brazo robot fue diseñado en CATIA v5 y manufacturado en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco. Los resultados obtenidos en la clasificación de color comprueban el éxito obtenido en la etapa de validación de los resultados de nuestra red neuronal, obteniendo un promedio general de 94.28%. Como se mencionó anteriormente, este porcentaje se puede mejorar cambiando las condiciones de iluminación, aunque el propósito general se logró con éxito. El controlador difuso entregó correctamente la posición angular de los servos, con ello se demostró que fue posible ejecutar el control de posición sin un modelo matemático del proceso, incorporando una base de conocimiento que emula el razonamiento humano.

Como trabajo futuro, se pretende incorporar este control en un sistema embebido con una cámara de alta velocidad y de esta forma eliminar el uso de una PC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Pasino, K. M. Pasino, Yurkovich S. (1998) *Fuzzy Control*. USA: Addison Wesley.
- [2]. Hagan M.T., Demuth H.T., Beale M.H. (1996). *Neural Networks Design*, Boston, MA: PWS Publishing.

- [3]. Lopez, M. B., Pérez, M. A. A., & Lizarralde, F. (2014). Experimental Results for a LMI-Based Fuzzy Visual Servoing Controller Applied in Robots Manipulators in 2D. *Epsilon*, (22), 151-168.
- [4]. Juang, J. G., Tsai, Y. J., & Fan, Y. W. (2015). Visual recognition and its application to robot arm control. *Applied Sciences*, 5(4), 851-880.
- [5]. Kim, H. J., Tanaka, Y., Kawamura, A., Kawamura, S., & Nishioka, Y. (2015, July). Improvement of position accuracy for inflatable robotic arm using visual feedback control method. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 767-772). IEEE.
- [6]. Azar, A. T., Ammar, H. H., & Mliki, H. (2018, February). Fuzzy Logic Controller with Color Vision System Tracking for Mobile Manipulator Robot. In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications* (pp. 138-146). Springer, Cham.
- [7]. Meena, P. K., & Bhushan, B. (2017). Simulation for Position Control of DC Motor using Fuzzy Logic. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*, (6), 188-191.
- [8]. Mirzadeh, M., Haghighi, M., Khezri, S., Mahmoodi, J., & Karbasi, H. (2014). Design Adaptive Fuzzy Inference Controller for Robot Arm. *IJ Information Technology and Computer Science*, 9, 66-73.
- [9]. Rivai, M., & Purwanto, D. (2015, May). Implementation of fuzzy logic control in robot arm for searching location of gas leak. In *Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2015 International Seminar on IEEE* (pp. 69-74).
- [10]. Wang, M. S. (2018). Eye to hand calibration using ANFIS for stereo vision-based object manipulation system. *Microsystem Technologies*, 24(1), 305-317.
- [11]. Ligutan, D. D., Cruz, L. J. S., Del Rosario, M. C. D., Kudhal, J. N. S., Abad, A. C., & Dadios, E. P. (2017). Design and implementation of a fuzzy logic-based joint controller on a 6-DOF robot arm with machine vision feedback. In *Computing Conference IEEE 2017*, (pp. 249-257).
- [12]. Zapata S. (2016). Object Tracking with a 2 DOF Robot Arm Using Fuzzy Logic. Consultado el 10 de abril de 2018, Mathworks: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/58205-object-tracking-with-a-2-dof-robot-arm-using-fuzzy-logic--matlabhw2k16>.
- [13]. Demuth, H., & Beale, M. (1993). *Neural Network Toolbox For Use with Matlab--User'S Guide Version 3.0*.
- [14]. Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer-Verlag.
- [15]. Pinckney, N. (2006). Pulse-width modulation for microcontroller servo control. *IEEE potentials*, 25(1), 27-29.
- [16]. Pololu Corporation: *Maestro Servo Controller. User's Guide (n.d.)* Obtenida de la página electrónica: <https://www.pololu.com/docs/pdf/0J40/maestro.pdf>

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Tecnológico Nacional de México para la construcción del brazo robótico 6 GDL, obtenido del proyecto "Módulo didáctico de brazos robots para el equipamiento del laboratorio de robótica" bajo el programa de Apoyo a la Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico de los programas educativos de los Institutos Tecnológicos Descentralizados.



Ciencias
de la
Computación

Ingeniantes

Comparative study of restoration tools by cloning using LSP method



Colaboración

José Luis Lira Turriza; Yaqueline Pech Huh; Jose Manuel Lira Turriza; Ariana Abigail Chi-Dzib; Miguel Angel Cohuo Avila, Instituto Tecnológico Superior de Calkini, Campeche

RESUMEN: Las herramientas de restauración en un laboratorio de cómputo se utilizan para el mantenimiento de los equipos que en él se encuentran. Una técnica utilizada es la de clonación de imágenes, que consiste en generar una imagen del sistema en un momento dado y sobre la que será restablecido. En este documento se han revisado tres herramientas como las mencionadas, usando la metodología de Puntuación Lógica de Preferencias (LSP) evaluando su Instalación, Usabilidad, Desempeño y Mantenibilidad, en los laboratorios del Instituto Tecnológico Superior de Calkini. Se pudo observar que el sistema llamado Clonezilla obtuvo 75 puntos porcentuales siendo el mayor de los tres.

PALABRAS CLAVE: Aplicaciones de Linux, Clonezilla, Laboratorios de computación, Restauración de software de equipos, Sistemas de clonación.

ABSTRACT: The restoration tools in a computer lab are used to maintain the equipment that is in it. One technique used is image cloning, which consists in generating an image of the system at a given time and on which it will be restored. In this document we have reviewed three tools such as those mentioned using the methodology of Logical Scoring of Preference (LSP) evaluating its Installation, Usability, Performance and Maintainability in the Instituto Tecnológico Superior de Calkini laboratories. It was observed that the tool named Clonezilla got 75 percentage points being the higher.

KEYWORDS: Clonezilla, cloning systems, Equipments Software Restoration, Computer labs, linux applications.

INTRODUCTION

Computers into computer labs are used to process and optimize activities of the end-users, this is one reason why are useful and essential for organizations and institutions, they generate competitive advantages that are reflected in the increased efficiency, learning and business growth.

Organizations commonly acquire computer equipment from the same vendor because it generates higher profits and better relationships with them, helping the technical service to reduce the type of parts of the equipment purchased since they have the same features in terms of hardware, so the software installation can be performed in a standardized manner.

In the ITESCAM, there is a policy of restoration for the computer labs where the stable initial configuration of all the needed programs is returned.

Currently, there are authors like Pressman that establish criteria for measure of software quality. In this document we present the compilation and classification of this information divided in three criteria: ease to install, ease to use, performance and maintainability, integrated through LSP methodology for, in a quantitative manner, compare two or more software's and determine the better, using the established indicators; in addition, we show the results of use it with three restoring and cloning tools for the equipment of ITESCAM computer center.

State of the art

The dedicated area for its required maintenance to protect needed programs of providing services either for poor performance, virus or organization policies, in order to maintain service levels [1]

Taking the advantages of the computer lab, the managers can use features of different programs to make a massive installation of the full content of hard disks, no matter if you have installed two operating systems (in some disks) or if you have installed some programs.

If a manager does not implement any of the programs that we will evaluate, to perform this work can be tedious and inefficient and it would take too long to finish the activity, because it would imply that the restoration of operating systems (one or more), drivers and applications installation that are used is going to be made computer by computer.

In the current market there are tools of software (copyright or copyleft) that offer disaster restoration, disk cloning and backup that are ideal to apply on computer labs or in connected computers by net for an efficient maintenance in the computers.

We name disk clone or Disk Image, as an exact copy of computer hard disk drive. The copy includes all the partition information, boot sectors, the file allocation table, operating system installation and software application. It saves the entire data from the disk, including the file structure and all the files and folders from the disk, in a single file [2]

Evaluate a system means establishing criteria based on properties that are expected to have, it can be made using oriented methods for economic effects, trying to express criteria in terms of financial indicators, from the perspective of quality with the classic works of [3] and [4], through metrical standards of software quality established in [5] and [6]., nevertheless metrics quality standards are standardized, evaluation methods that operate over these are different as can

be shown in [7], and usually are always focused on aspects of software design and development. One of the quantitative methods is Logical Score Preference (LSP). It is used to evaluate, compare, and select software and hardware, and is a generalization and extension of several techniques of quality [8] and [9]. LSP does not specify a criterion, but it gives us a method to get a list to evaluate quantitatively criteria for comparing as is showed in [10].

The chosen tools are: Acronis, Clonezilla SE and Symantec Ghost Solution Suite that permit creating and cloning an image.

MATERIALS AND METHODS

Methodology

An experiment was made using Installation Labs of the institute with thirty-five computers for the massive deployment of a disk image from a hard disk of 500Gb containing 80 GB of information and with two operating systems: Windows 7© and Linux Ubuntu 14.04.

At the beginning of the test we followed next steps:

- i. Review Connectivity
- ii. Operating System Installation as a server
- iii. Preparation of a client computer to install required operating systems and applications in the computer lab.
- iv. Installation of cloning software on the server
- v. Saving the disk image on the client from server.
- vi. Cloning target computers of the computer lab.

Software Description

The characteristics of the three tools to be used to accomplish the target are presented below:

Clonezilla SE. It is a free software used for restoration management of hard disk to different clients, it is a tool that permits to start the operating system in the net machines, without having an operating system installation in the locally, with Clonezilla (included) we can clone several computers simultaneously. It is a program that works over Linux distributions and permits to clone the hard disk. It is important to mention that is an open software, available for all users.

Symantec Ghost Solution Suite. It is a commercial software that is used for the creation of disk images of systems; and it is compatible with Windows, although it can install in other operating systems using another tools.

Acronis It provides security copies and restoration solutions after disasters and let us access to security data through a security software giving us access to security data in physical servers, virtual servers, and the cloud. It includes a feature called Universal Restore that permits to restore security copies simultaneously on any computer, independently of the platform.

Hardware Description

The tests were made on connected computers in a switch 3COM Ethernet with the next features:

Server:

- i. Brand: DELL
- ii. Model: DCSLF
- iii. Operating Systems: Ubuntu 14.0.4 LTS, Windows 7 Professional ©
- iv. Processor: Intel Core Duo
- v. Memory RAM: 512 Mb
- vi. CPU Speed: 2.8 GHz
- vii. BUS CPU Speed: 800 MHz
- viii. Hard-disk Capacity: 80 Gb

Client:

- i. Brand: IBM
- ii. Model: 8215G1S
- iii. Operative Systems: Windows 7 Ultimate 32 bits Xubuntu 14.04
- iv. Processor: Intel Core Duo
- v. RAM Memory: 512 Mb
- vi. CPU Speed: 2.8 GHz
- vii. BUS CPU Speed: 800 MHz
- viii. Hard-Disk Capacity: 80 Gb

An overview of the lsp method

Software systems can be evaluated from different criteria; it depends of the evaluator's point of view. For instance, the users expect that the system can satisfy their requirements without considering the features described by the product. The LSP method can be defined by three steps:

Creating a System Attribute Tree

First, define the components to evaluate, these components can be systematically identified using a system requirement tree described [8]. For instance, for the first component in our case we identify the Installation. We could follow the next decomposition structure:

Installation

- i. Environment
- ii. Configurable Options: A) Path selection and B) Customize applications

The decomposition process ends when the components cannot be further decomposed and can be measured and evaluated. This last level of the requirement tree is named performance variables.

Defining elementary criteria

For each measured component (performance variable), elementary criteria function will be determined. This function represents the level of satisfaction for each component value. The interval of these values is and it represents the degree of truth in the measured component. For instance, if denotes Response time, we can determine the maximum and minimum time to respond. In this case, while we wait more time to respond, it will be less acceptable for the user.

The function that computes the elementary criteria E as a function of can be defined as a decreasing function with the equation (1).

$$E = 100 \min \{1, \max[0, (t_{max} - t)/(t_{max} - t_{min})]\} \quad 0 \leq E \quad Ec.(1)$$

This mapping can be conveniently expressed using the preference scale shown in figure. 1.

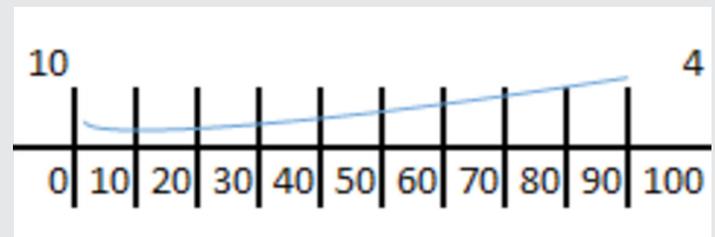


Figure. 1. An example of elementary criterion tomado de (J. Du- jmović and Bai 2006).

Similar elementary criteria can be defined for all n performance variables, and from these criteria we get a group of elementary preferences: E_1, \dots, E_n . With these elementary preferences we can compute the global value that reflects the total satisfaction of all requirements.

Development of preference aggregation structure

It consists of superposition of appropriate aggregation operators. In this document we define four main components with different priorities and all of these components with its own priority or importance degree. Is for that LSP consider preference aggregators with adjustable weights; an aggregator that has input preferences generates the output preference like shown in using the equation (2).

$$e_0 = (w_1 e_1^r + \dots + w_k e_k^r)^{1/r}$$

$$0 < w_i < 1, w_1 + \dots + w_k = 1 \quad Ec(2)$$

$$0 \leq e_i \leq 1, i = 0, 1, \dots, k$$

Weights reflect relative importance of the input and the exponent reflect the properties of the aggregators.

In the Figure. 2 presents seventeen aggregators with symbolic names and its values of exponent . If we aggregate preferences and then, the aggregator value will be between and, approximately.

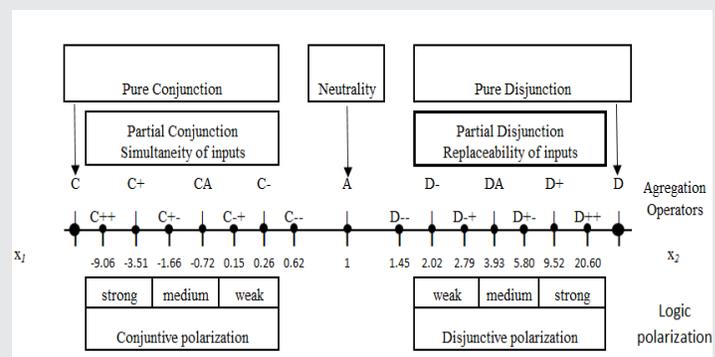


Figure 2. Preference aggregator from and to or.

We can calculate the global preference that reflects the global satisfaction of the evaluator's requirements [11]. with equation (3)

$$E0 = L(E1,..En) = L(g1(x1),..gn(xn)) = G(x1,..xn) \quad Ec(3)$$

The aggregation function is created using logic aggregation of preferences like [8], [12] and [9] and shown in Figure. 3.

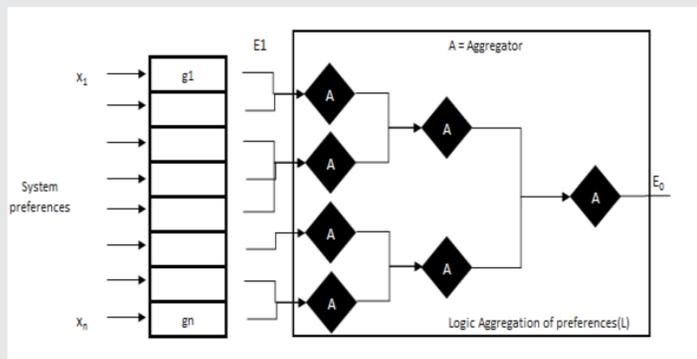


Figure 3. Complex criterion model using LSP.

COMPARISON CRITERIA

Our interpretation of the evaluation methods, we based it on a qualitative and quantitative method in accordance of the features of the tools that it described each tool Clonezilla [13], Ghost Symantec [14], Acronis [15] and also use the knowledge of experts in each of the platforms. We consider the evaluate systems and those who use it, the user needs and the degrees in that this evaluate systems satisfy the requirements. For that the users of the platforms are managers, responsible of technical support or users that have the needed of made a massive restoration of the cloning image(disk-image).

For each variable we define a form to measure. The next steps are examples of three types of measurements that we use in this paper.

1. ID: R8 Architecture: It evaluates the compatibility of the different architectures and the distinct processors that exists in the market assigning from point to point for each handled architecture.

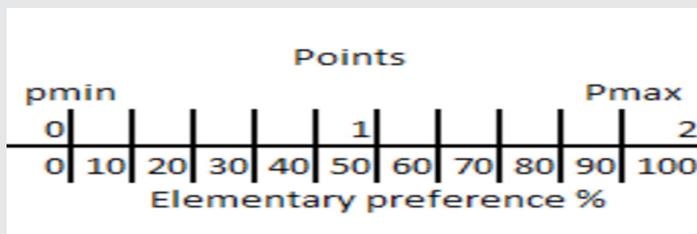


Figure. 4. An example of direct score.

Points that reflects the capacity of the tool for install in distinct architectures allowing a mayor compatibility.

2. D: R34 Speed for create image. This evaluates using a relative criterion. Times average to create the image times, that is to say, for each times to the time is calculated by the with equation (4). The correspondent criteria is showed in figure. 5.

$$E0 = L(E1,..En) = L(g1(x1),..gn(xn)) = G(x1,..xn) \quad Ec(4)$$

3. ID: R10. Installation manual. It is evaluate using a binary criterion: 1 (100%) denotes existence and 0 denotes its absence of this manual.

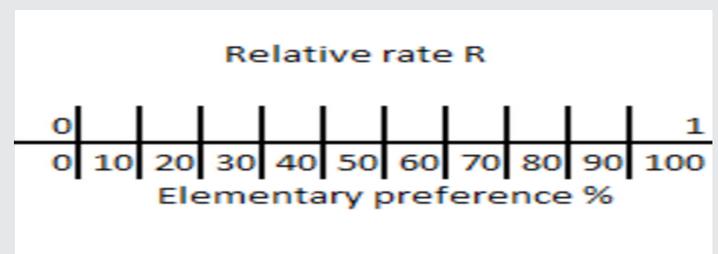


Figure. 5. An example of relative score.

With that and the use of the LSP Method we establish the criteria of comparison. We identify fourteen relevant components (performance variables) group by four main areas: Installation, Usability, Performance and Maintainability, each of them is assigned to identify named to . Speed in the creation of image. This evaluates using a relative criterion. The mean of the times in the generation of an image n times, ie for the times the time is calculated calculated by the with equation (5)

$$Ri = \min(t1,t2,...,tm) / ti. 0 < Ri \leq 1 \quad Ec(5)$$

The corresponding criteria is: it is assigned to an identification named until ; this is for the purpose of avoid wrong results by misinterpretation of the qualitative factors assigned. Each one we assign a weight for criterion. This criterion was assigned according to importance in reference to the finality of the tools (where it holds that the sum of the measures in each block must be 100), also it is assigned to each block a corresponding symbol to andness and orness value. With all information we generate a structure that we present in the tables 1, 2, and 3. They represents the mechanisms that will use to measure each tool in this study. The main component aggregation structure of the global score is showed in the table 4.

Table 1 Installation Component

Id	Elementary Criteria	Operator	Blok ID	Operator	
R1	Environment: Friendliness			17	
R2	Path Selection for installation.	30	DA Configurable Options	16	
R3	Customize applications or packages.	40			
R4	Language Selection	30			
R5	Speed	50			
R6	Resource consumption	50	A	Performance	16
R7	Number of OS permitted	30	CA	Compatibility	34
R8	Architecture(x86, x64, etc.	40			
R9	Compatibility with other applications	30			
R10	Online Help	20	D++	Help	17
R11	Installation Manual	20			
R12	Help tutorials	20			
R13	FAQs(Frequently Asked Questions)	20			
R14	Troubleshooting	20			

Table 2 Usability Component

Id	Elementary Criteria	Operator	Blok ID	Operator	
R1	Environment: Friendliness			17	
R2	Path Selection for installation.	30	DA Configurable Options	16	
R3	Customize applications or packages.	40			
R4	Language Selection	30			
R5	Speed	50			
R6	Resource consumption	50	A	Performance	16
R7	Number of OS permitted	30	CA	Compatibility	34
R8	Architecture(x86, x64, etc.	40			
R9	Compatibility with other applications	30			
R10	Online Help	20	D++	Help	17
R11	Installation Manual	20			
R12	Help tutorials	20			
R13	FAQs(Frequently Asked Questions)	20			
R14	Troubleshooting	20			

Table 3 Performance and Mantenibility Component

Id	Elementary Criteria	Operator	Blok ID
R34	Disk image generation Speed	25	C++ Performance
R35	Disk image restoration Speed	25	
R36	Disk Image Size	25	
R37	Fault tolerance	15	
R38	Scalability	10	
R39	Changes	50	A Maintainability
R40	Versioning	50	

Table 4 Global Score

Id	Components	Operator	Block Id
1	Installation	25	A Global Score
2	Usability	25	
3	Performance	40	
4	Maintainability	10	

Clonezilla SE.

Clonezilla SE. Installation process does not present a graphical environment. It was made with command line. It was the same for configuration options. All options present a description in text mode. In the program configuration it presents different options and the most of them was difficult to understand and deduce at moment to choose one. Configuration options and installation itself present an environment poor for people that does not have experience in the area. Even for people with some previous knowledge, it could be difficult to handle. As shown in Table 5

Table 5 Global Score for Software

Name	Global Score value				Total
	Installation	Usability	Performance	Maintainability	
Clonezilla	11.60%	24.10%	39.92%	0%	75.63%
Norton Ghost	13.50%	23.85%	10%	5%	52.36%
Acronis	13.10%	23.9%	24%	10%	70.54%

Symantec Ghost Solution Suite

This program results ease to install, it presents a graphical environment where is only necessary to click in the option that we need, and the program will do the rest. As its name suggest it presents a suite to choose options that we want to install, there is a good documentation about each part of the suite, but we use GhostCast Server (cloning disk and partition through net) ad Ghost Boot Wizard (build boot disks and partitions of Ghost). Installation options are clear and easy to understand so an inexperienced user in the area could use this program. However, is a copyright software and has a cost for its use. As shown in Table 6

Table 6 Clonezilla results

Clonezilla SE					
Block ID	Input	Operator	R	Score	
WeightSymbol					
Installation	46.41	25	A	11.6025	75.628
Usability	96.42	25		24.105	
Performance	99.80	40		39.92	
Maintanability	0	10		0	

Acronis

For this program, the installation presents a graphical environment where is only necessary follow the guide steps. To install this program was necessary to activate a service from Acronis. We had some problems at the moment to operate the program, for instance when we tried to share a file through the net, it failed. Another problem

was at the moment to restore a computer, although the disk image was cloning correctly, at the moment of restoring, it marked an error at the end of the process. The installation an operational experience for both software was easy to handle. As shown in Table 7

Table 7 Acronis results

Acronis					
Block ID	Input	Operator	R	Score	
WeightSymbol					
Installation	52.4	25	A	13.10	70.54
.5Usability	95.6	25		23.9	
Performance	59	40		23.54	
Maintainability	100	10		10	

CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS.

Clonezilla SE is a software that does not present an attractive environment for users. Even though its interface is not graphical the command line describes a group of instructions that each option that represent. This indicates that it is not a good choice for users that are used to graphical environments. However, its process of disk cloning and computer restoration connected to an intranet of organization where the number of computers is significantly in a short time and efficiently supporting different operative systems sticks out over Acronis and Ghost.

Acronis has almost features that we need in a computer lab, inclusive it supports both operative systems Windows© and Linux, and it has support for mac solutions. One disadvantage of this tool is the compatibility, in some cases we have problems with other programs installed in the target machine.

Symantec Ghost Solution Suite on the other hand is a good solution for persons who needs clone his disks only for backup its data. The main disadvantage is that only permit clone and restore Windows© Operative System.

Although the cost is not part of our study and it is not affect the performance of the tool, we consider the cost at the moment to choose one of them.

In conclusion, when you need to make a disk cloning with one or two operating systems, indeed, Clonezilla SE it is the best option. Nevertheless, both Acronis and Ghost are very good tools especially for those that like graphical environment and, as mentioned at the beginning of the document, the decision of getting a software depends of the type of end-user and the possibilities of the organizations.

In future works we will compare software at different work environments using the indicators and criteria established in this document to observe behavior.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. van Bon, "Fundamentos de Gestión de Servicios TI, basado en ITIL®," ed: Van Haren Publishing, Reino Unido, 2008.

[2] B. P. Gautam and D. R. Paudel, "A NETWORK LAB EXPERIMENT OF MULTI-CLONING OF OS BY USING CLONEZILLA, 稚内北星学園大学紀要", pp. 51-58, 2012.

[3] B. W. Boehm, J. R. Brown, and M. Lipow, "Quantitative evaluation of software quality," in Proceedings of the 2nd international conference on Software engineering, 1976, pp. 592-605.

[4] J. A. McCall, P. K. Richards, and G. F. Walters, "Factors in software quality. volume i. concepts and definitions of software quality," DTIC Document1977.

[5] P. Antonellis, D. Antoniou, Y. Kanellopoulos, C. Makris, E. Theodoridis, C. Tjortjis, et al., "A data mining methodology for evaluating maintainability according to ISO/IEC-9126 software engineering-product quality standard," Special Session on System Quality and Maintainability-SQM2007, 2007.

[6] S. Trudel, J.-M. Lavoie, M.-C. Paré, and W. Suryn, "PEM: The small company-dedicated software process quality evaluation method combining CMMI SM and ISO/IEC 14598," Software Quality Journal, vol. 14, pp. 7-23, 2006.

[7] N. Fenton and J. Bieman, Software metrics: a rigorous and practical approach: CRC Press, 2014.

[8] J. Dujmović and H. Bai, "Evaluation and comparison of search engines using the LSP method," Computer Science and Information Systems, vol. 3, pp. 31-56, 2006.

[9] J. J. Dujmović and H. Nagashima, "LSP method and its use for evaluation of Java IDEs," International journal of approximate reasoning, vol. 41, pp. 3-22, 2006.

[10] L. Olsina and G. Rossi, "A quantitative method for quality evaluation of web sites and applications," IEEE multimedia, vol. 9, pp. 20-29, 2002.

[11] H. Q. Yu and S. Reiff-Marganiec, "A method for automated web service selection," in Services-Part I, 2008. IEEE Congress on, 2008, pp. 513-520.

[12] J. Dujmović, "A method for evaluation and selection of complex hardware and software systems," in CMG 96 Proceedings, 1996.

[13] J. Bowling, "Clonezilla: build, clone, repeat," *Linux journal*, vol. 2011, p. 6, 2011.

[14] S. Ghost, "Implementation Guide," Syman-
tec, Corp.,(copyright 1999), 1998.

[15] Y. S. Per, M. V. Lyadvinsky, S. M. Belous-
sov, and J. V. Tsibrovski, "System and method for
consolidation of backups," ed: *Google Patents*,
2011.

Agradecimientos

The authors would like to express their gratitude
to the Tecnológico Nacional de México and ITES-
CAM.



Ciencias
de la
Computación

Ingeniantes

Mapa de bits para compresión de imágenes médicas



Colaboración

Miguel Angel Delgado López; Francisco Javier Luis Juan Barragán; Julio César Chávez Novoa, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henriquez Campus Chapala

RESUMEN: La cantidad de información crece de forma exponencial en todos los ámbitos y el área médica no es la excepción ya que actualmente los estudios como radiografías se realizan de forma digital requiriendo Gigabytes y Terabytes de espacio de almacenamiento; las primeras soluciones es almacenar dichas imágenes en formatos como JPG, sin embargo pierden información al utilizar algoritmos de compresión con pérdida, lo que las hace inservibles para análisis computacionales tales como detección de lesiones cancerígenas, por lo que el presente trabajo emplea una mecanismo que permite comprimir la imagen salvaguardando la información importante en la zona de interés y rellenando con un color sintético las partes que no afectan en los análisis, obteniendo así una reducción considerable; encontrando que en imágenes de prueba con peso de 16 MB se redujeron a tan solo 5.1 MB, lo que representa un ahorro casi del 70% de espacio de almacenamiento.

PALABRAS CLAVE: Compresión, Radiografía, Mapa de bits, Procesamiento de imágenes

ABSTRACT: The amount of information grows exponentially in all areas and the medical area is no exception since currently studies as radiographs are done digitally requiring Gigabytes and Terabytes of storage space; the first solutions is to store these images in formats such as JPG, however they lose information when using lossy compression algorithms, which makes them useless for computational analysis such as detection of carcinogenic lesions, so this work uses a mechanism that allows compress the image safeguarding the important information in the area of interest and filling with a synthetic color the parts that do not affect the analysis, thus obtaining a considerable reduction; finding that in test images with weight of 16 MB were reduced to only 5.1 MB, which represents a saving of almost 70% of storage space.

KEYWORDS: Compression, Radiography, Bitmap, Image processing.

INTRODUCCIÓN

La compresión de datos se ha convertido en una ciencia dentro del área de los sistemas computacionales y aún cuando la idea es muy simple, pues tiene el principio de almacenar la mayor cantidad de datos en el menor espacio posible, sin embargo, se debe partir de la premisa de que no existe un algoritmo que sea capaz de comprimir cualquier conjunto de datos.

Actualmente se intenta obtener algoritmos de compresión especializados en datos específicos como música, videos o textos, por lo que las imágenes médicas no son la excepción, ya que muchos trabajos han intentado eliminar la información innecesaria y mantener solo la relevante, haciendo que el archivo ocupe menos espacio en dis-

co pero siga siendo funcional en análisis posteriores, así pues, el presente trabajo plantea un mecanismo que permite la compresión de imágenes médicas (mamografías) salvaguardando la información importante y rellenando los demás pixeles con un color sintético que mantenga el aspecto original de la imagen, (Noreña, 2013): destaca que hay trabajos donde se emplean algoritmos de compresión utilizando zonas de interés ROI (Region Of Interest), y que uno de los grande problemas es la detección de dichas zonas y el tratamiento que se da a cada una, (Ruedin, 2007): propone que se realice un corte asimétrico en la zona de interés a fin de rellenar con un color sintético todo el contenido que no esté en la zona, elevando las tasa de compresión de forma automática.

La compresión de imágenes médicas se hace importante si consideramos que el Instituto Jalisciense de Cancerología realizó en 2014 8043 mamografías, las cuales tomando en cuenta un peso promedio de 100 Mb, resulta en más de Medio Terabyte de almacenamiento anual, agravándose al obtener datos del reporte de Salud de Estados Unidos, donde se reportan más de 22 millones de estudios en 2016, necesitando Hexabytes de almacenamiento por año.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología propuesta para realizar la compresión de datos se basa principalmente en 3 etapas, la primera permite identificar cuáles son los pixeles que se encuentran en la zona de interés (ROI - region of interest), que es la información que debe almacenarse sin cambios, para lo cual se emplea una matriz de bits que permite discretizar todos aquellos pixeles que pueden ser sustituidos por un color negro sintético ya que no aportan información relevante para análisis como detección de cáncer, ruptura, etc., de dichas imágenes, posteriormente se almacena la matriz de bits junto con la información obtenida de los pixeles que se encuentran en la ROI y finalmente, se procede a aplicar mecanismos de compresión sin perdida tradicionales para obtener una mejora en la tasa de compresión. La Figura 1 muestra el esquema propuesto de compresión.

Durante la primera etapa se emplea un esquema de conversión de color estandarizado de RGB (Red, Green, Blue) a escala de grises, mediante la fórmula que propone (MathWorks, 1994 -2017) en la formula a:

$$gris = (0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B) \tag{Ec 1}$$

Formula 1. Conversión escala de gris

Al obtener el tono de gris este es comparado con un umbral que puede ser un valor absoluto establecido por el usuario o calculado mediante la formula de la formula 2:

$$umbral = \frac{\sum_{x=0,y=0}^{n,m} gris(x,y)}{n + m} \tag{Ec 2}$$

Fórmula del umbral

Durante la construcción de la matriz de bits que representarán la máscara de recorte se puede observar que mediante la técnica propuesta se obtienen resultados favorables en comparación con recortes cuadrados, circulares o cortes asimétricos propuestos por otros investigadores, ya que este metodología pretende eliminar la mayor cantidad de información innecesaria, pudiendo quitar pixeles intermedios durante el recorrido por toda la imagen y construyendo la matriz de acuerdo a la premisa de la formula 3, tomando en cuenta que x representa el ancho de la imagen, mientras que y hace referencia a la altura de la misma:

$$umbral = \frac{\sum_{x=0,y=0}^{n,m} gris(x,y)}{n + m} \tag{Ec 3}$$

Construcción de la matriz

Un punto medular en en la segunda etapa es la representación de la matriz, ya que si contemplamos que el uso de memoria para el proceso es importante debe cuidarse, en la formula 4 de puede observar como se emplea un mecanismo que almacena en 1 byte 8 valores de la matriz obteniendo:

$$\begin{pmatrix} 243 & \dots \\ 12 & \dots \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11110011 & \dots \\ 00001100 & \dots \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix} \tag{Ec 4}$$

Representación numérica de la matriz

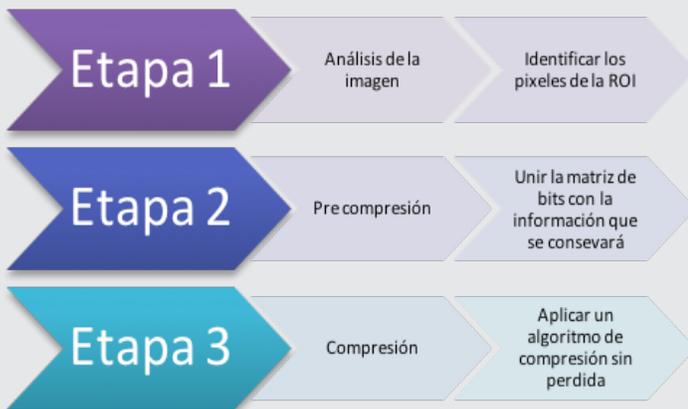


Figura 1. Esquema de trabajo

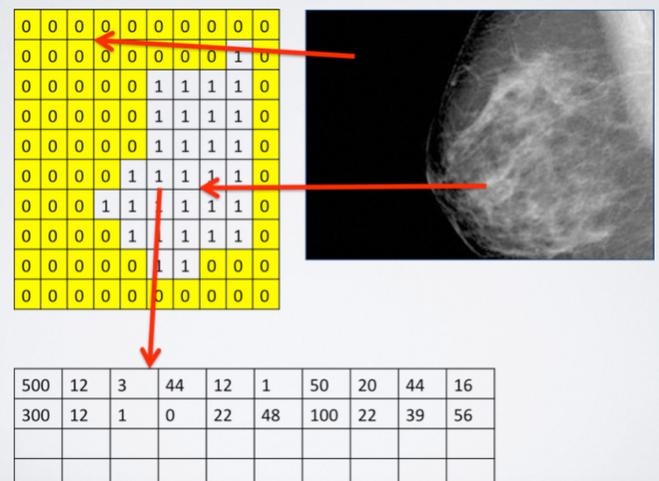


Figura 2. Proceso se compresión

Obteniendo así una compresión automática en la etapa tres del proceso, pues en lugar de almacenar la información perteneciente al pixel, solo es necesario almacenar 1 bit que indica si el pixel en cuestión es información que debemos conservar o podemos sustituir con un color sintético cuando se requiere leer la imagen comprimida, un ejemplo más claro se ve en la Figura 2.

RESULTADOS

Partiendo de los autores y premisas planteadas, se comenzó con la creación de un mecanismo que realice la matriz de bits que representen el mapa de bits de la imagen que se pretende comprimir, La Figura 3 muestra la imagen de prueba.

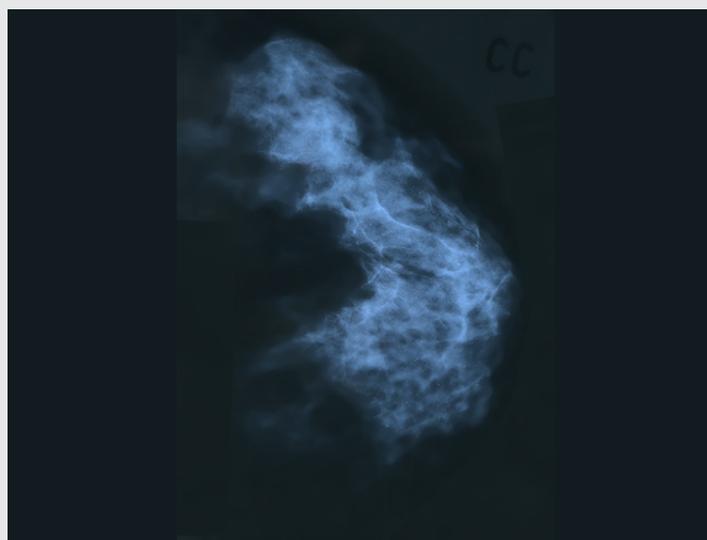


Figura 3. Imagen de prueba.

La Tabla 1 presenta las características de formato de la Figura 4:

Tabla 1. Características de la imagen de prueba

Formato	PNG
Tamaño	356x500 Pixeles
Peso	768KB
Color	RGBA

El mecanismo utilizado para la detección de bordes, es mediante la intensidad de color, tomando en cuenta las características de las mamografías y los análisis que se realizan, pues lo que se pretende conservar como zona de interés es el color blanco (tonalidades que tienden a blanco), dicho proceso permite tener una granularidad variable en la máscara de bits haciendo que la zona de interés no necesariamente sea continua en la imagen, logrando eliminar la mayor cantidad de pixeles no importantes en la imagen, en la Figura 9, se puede observar las zonas que serán conservadas y las que se eliminarán.

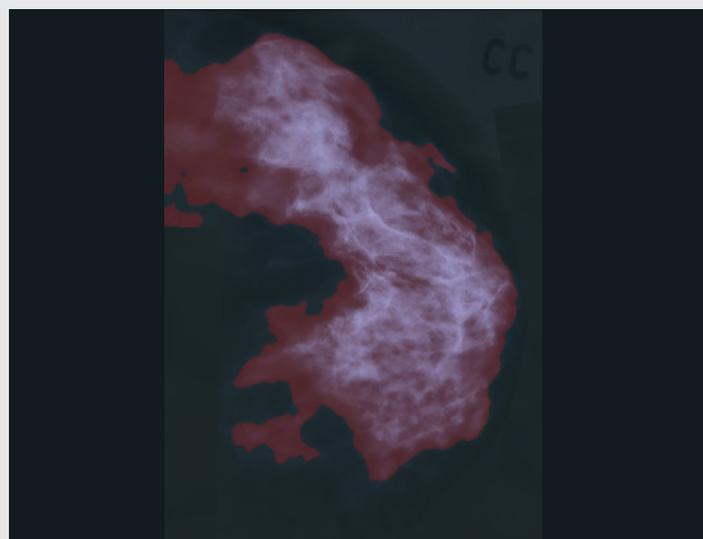


Figura 4. Detección de zonas de interés

Para lograr el resultado de compresión, se realizaron varias funciones de conversión y algoritmos que recorren la imagen creando la máscara de bits obteniendo una codificación donde se puede observar que solo tiene 0 y 1, correspondientes a las zonas de interés, y las que serán eliminadas y sustituidas por un color sintético, permitiendo que solo la información en la ROI sea almacenada en el nuevo archivo, reduciendo así el tamaño final de la imagen. La Figura 5, ilustra como el procedimiento planteado aplica la máscara de bits no continua eliminando así la mayor cantidad de información posible de la imagen.

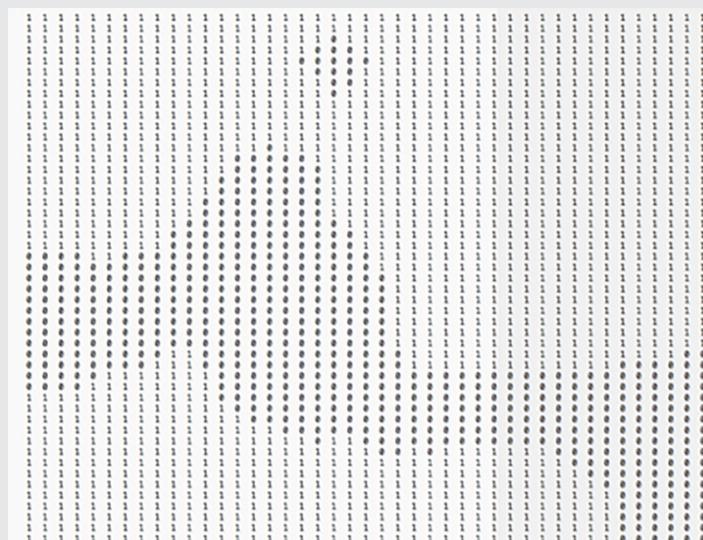


Figura 5. Máscara de bits

Como resultado de esta fase de investigación se tiene un primer prototipo de la aplicación que realiza la codificación y decodificación de las imágenes médicas para probar que el mecanismo que se utili-

za realmente es funcional, encontrando que la imagen original tiene un peso aproximado de 768KB, y después del proceso de pasar por el mecanismo de compresión propuesto, la imagen solo requiere 7KB de almacenamiento. Sin embargo, se seguirá trabajando para aplicar mecanismos de compresión sin pérdida para reducir el peso sin afectar los diagnósticos de los exámenes en estas imágenes. En la Figura 6 se muestra de lado izquierdo la imagen original, mientras que en el derecho la resultante después de realizar el proceso de compresión y descompresión, además se puede observar como es que se conservaron los píxeles de la zona de interés.

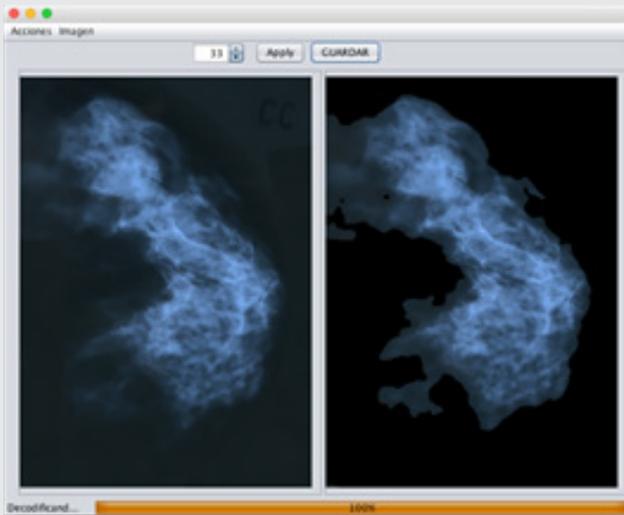


Figura 6. Imagen original y resultante

Las pruebas realizadas con diferentes imágenes y resoluciones en formato PNG arrojan resultados positivos en un 100% de los casos, pues se pueden comprimir las imágenes sin perder la información relevante ahorrando espacio como lo muestra Tabla 2.

Tabla 2. Pruebas de compresión

Formato	Color	Resolución	Peso Original	Peso Final
PNG	RGB	356x500	768KB	7KB
PNG	RGB	3392 x 4771	16MB	5.1MB
PNG	RGB	200 x 269	157KB	31KB
PNG	RGBA	496 x 496	1.1MB	28KB

El mecanismo de compresión también se aplicó en 100 mamografías de pacientes anónimos, las cuales fueron proporcionadas por el Instituto Jalisciense de Cancerología, los cuales arrojan resultados favorables, pues en todos los casos se obtiene una disminución en el peso de los archivos finales de entre un 30% y 70% sin afectar la información contenida en las regiones de interés como lo muestra la Figura 7.

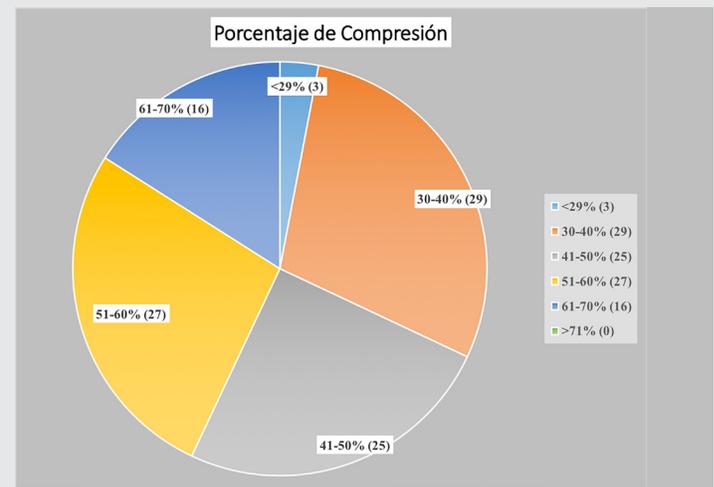


Figura 7. Gráfica de porcentaje de compresión de mamografías

CONCLUSIONES

Tomando como referencia los resultados obtenidos, se puede observar que el ahorro de espacio es significativo por lo que este mecanismo se vuelve importante para aplicarse a fotografías médicas, sin embargo cabe mencionar que uno de los puntos que juega en contra del mecanismo planteado es el uso de memoria, así como el tiempo de procesamiento, por lo que en futuros desarrollos debe optimizarse para aprovechar el uso de tecnologías paralelas combinadas con el cómputo en la nube para lograr que el proceso se vuelva estandarizado y pueda aplicarse en un entorno de producción, beneficiando a un sin número de hospitales y centros radiológicos que precisan almacenar grandes cantidades de imágenes médicas sin pérdida de información en la región de interés que posteriormente pasarán por análisis computacionales.

El mecanismo propuesto brinda al sector salud no solo el ahorro de espacio de almacenamiento, pues actualmente muchos de los centros radiográficos envían mediante internet las radiografías (mamografías) a centros especializados de evaluación, por lo que al tener menor cantidad de información, el proceso requerirá de menor tiempo, tanto de transmisión, como de análisis.

BIBLIOGRAFÍA

[1] *Canónico, J. R. (02 de 2010). Transformacion de imagenes medicas basadas en transformada on-dúcula (Wavelet) para aplicaciones en telemedicina. Recuperado el 8 de 05 de 2017, de Universidad Católica Andres Bello: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS1544.pdf>*

[2] *LOSSLES IMAGE COMPRESSION. (s.f.). Recuperado el 12 de 03 de 2017, de Univerity of florida: <https://www.cise.ufl.edu/~sahni/papers/encycloi-mage.pdf>*

- [3] Crespí, F. G. (2012). Implementación de algoritmos de compresión de imágenes en FPGAs. Recuperado el 19 de 09 de 2017, de Grupo de Arquitectura y Tecnología de COMputadores: <http://atc.umh.es/gatcom/Ficheros/Articulos/JCRA2012.pdf>
- [4] Aguilera, P. (s.f.). Comparison of different image compression formats. Recuperado el 23 de 05 de 2017, de University of Wisconsin-Madison: https://homepages.cae.wisc.edu/~ece533/project/f06/aguilera_rpt.pdf
- [5] Bruna, A. (03 de 04 de 2008). Principles of Image Compression. Recuperado el 12 de 03 de 2017, de Università degli Studi di Catania: [http://www.dmi.unict.it/~battiato/EI_MOBILE0708/Image%20Compression%20\(Bruna\).pdf](http://www.dmi.unict.it/~battiato/EI_MOBILE0708/Image%20Compression%20(Bruna).pdf)
- [6] Dutta, S. (12 de 2012). An Efficient Image Compression Algorithm Based on Histogram Based Block Optimization and Arithmetic Coding. Recuperado el 03 de 01 de 2017, de International Journal of Computer Theory and Engineering: <http://www.ijcte.org/papers/614-A1049.pdf>
- [7] Jassim, F. A. (10 de 2012). FIVE MODULUS METHOD FOR IMAGE COMPRESSION. Recuperado el 10 de 02 de 2017, de Signal & Image Processing : An International Journal SIPIJ: <http://aircconline.com/sipij/V3N5/3512sipij02.pdf>
- [8] Jessier, M. (03 de 05 de 2017). Lossy vs Lossless Image Compression. Recuperado el 29 de 06 de 2017, de Imagify: <https://imagify.io/blog/blog/2017/05/03/lossless-vs-lossy-image-compression/>
- [9] Mathworks. (s.f.). rgb2gray. Obtenido de Mathworks: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2gray.html>
- [10] Mertz, D. (11 de 05 de 2012). Un manual sobre compresión de datos. Recuperado el 9 de 08 de 2017, de IBM: <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/l-compr/index.html>
- [11] Noreña, T. (2013). Compresión de imágenes médicas. Recuperado el 08 de 06 de 2017, de Biomedica: <https://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/804/1780>
- [12] Rodríguez, E. (2016). Necesidades de Almacenamiento en Radiología Digital. Recuperado el 23 de 04 de 2017, de Imagenologia: <http://imagenologia.robustiana.com/34-almacenamiento-radiologia-digital>
- [13] Ruedin, A. (18 de 10 de 2007). Compresión de imágenes de resonancia magnética sin pérdida en la región de interés. Recuperado el 12 de 02 de 2017, de Departamento de Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37843032/CompresionMRI_RPIC_07.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53U-L3A&Expires=1510778272&Signature=Tcf%2Fkl-V1MHs1yZkaUeWyMuDzThc%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCompresion_de_imagenes_de_resonancia_mag.pdf
- [14] Starosolski, R. (20 de 12 de 2016). Simple Fast and Adaptive Lossless Image Compression Algorithm. Recuperado el 21 de 03 de 2017, de inter-science.wiley.com: <http://sun.aei.polsl.pl/~rstaros/papers/s2006-spe-sfalic.pdf>
- [15] Tejedor, R. R. (06 de 2002). Desarrollo de Algoritmos de Optimización Visual en Imágenes Médicas. Recuperado el 16 de 08 de 2017, de UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID: <http://optica.csic.es/papers/pfc-rredondo.pdf>
- [16] Welstead, S. (1999). Fractal and Wavelet Image compression Techniques. Florida: SPIE.
- [17] González L. (2013) Un enfoque para la compresión de imágenes médicas basdo en regiones de interés y compensación de movimiento. Recuperado el 16 de 04 de 2018, de Facultad de Ciencias Exactas, UNICEN, Tandail, Argentina: <http://42jaiio.sadio.org.ar/proceedings/simpuestos/Trabajos/CAIS/15.pdf>
- [18] Arantza Bereciartua Pérez. (2016). Desarrollo de algoritmos de procesamiento de imagen avanzado para interpretación de imágenes médicas, de Tecnalia Research and Innovation Sitio web: http://www.computervisionbytecnalia.com/wp-content/uploads/2016/12/Tesis_Arantza-Bereciartua_Memoria_completa_FINAL.pdf
- [19] Adrián Peña Peñate. (Enero-Marzo 2016). Módulo de filtrado y segmentación de imágenes médicas digitales para el proyecto Vismedic. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 10, 13-27. <http://www.redalyc.org/html/3783/378343684002/>
- [20] Aparicio Pico. (Enero - Julio 2016). Compresión de imágenes, en el servicio radiológico como un componente de infraestructura en el modelo de salud colombiano. Igenium. 16-08-2018, De EBSCO Base de datos. <http://web.b.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrn-l=01247492&AN=116595999&h=1GODjyua7eOW%-2fe%2bPrNcHVgfukTpqXXIfO8wj418YH4hlf%2b4-0efYkiPlwpfcAEeAj2Q6D6cq8%2ffZNdo0cOWo-HPw%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=logIn>

aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26s-
cope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%-
3d01247492%26AN%3d116595999

[21] Espinosa Bermeo. (Dic-2015). *Compresión de imágenes médicas con formato DICOM mediante familias Wavelets basadas en funciones atómicas*, de Repositorio Universidad Técnica de Ambato Sitio web: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/19375>

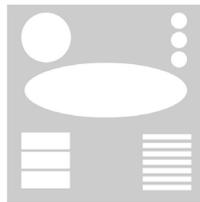
[22] Encarnación Moyano Ávila. (2016). *Técnicas de compresión y codificación sobre imágenes médicas*. de Universidad de Castilla-La Mancha Sitio web: <https://documat.unirioja.es/download/articulo/2292695.pdf>



Tierra,
Medio Ambiente
y Energía

Ingeniantes

Circuito elevador de voltaje para una celda solar mediante dispositivos electrónicos para encendido de LED's



Colaboración

Jeremías Bravo Tapia, Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio

RESUMEN: En el presente se muestran las pruebas realizadas para la elevación del voltaje desde 1.5 y 3 Volts mediante la aplicación de un circuito electrónico oscilador con la finalidad de ser aplicado en las celdas solares para mejorar su rendimiento en la producción de energía eléctrica.

En las pruebas realizadas se ha logrado incrementar el voltaje desde 1.5 V hasta más de 30 V y de 3 V hasta 42 V. Las pruebas se realizaron con LED's (Diodos Emisores de Luz) de 5 mm y LED's de potencia de 3 Watts, transistores, resistores, capacitores un transformador toroidal, una fuente de alimentación de cd y un pequeño panel solar que tiene tres celdas solares de 1.5 V a 100 mA al conectarlas en serie produce hasta 4.5 V.

PALABRAS CLAVE: Celda solar, eficiencia en celdas solares, elevador de voltaje, LED's, circuito oscilador.

ABSTRACT: In the present the tests carried out for the elevation of the voltage from 1.5 and 3 Volts are shown by means of the application of an electronic oscillator circuit with the purpose of being applied in the solar cells to improve its performance in the production of electrical energy.

In the tests carried out it has been possible to increase the voltage from 1.5 V to more than 30 V and from 3 V to 42 V. The tests were performed with LED's (Light Emitting Diodes) of 5 mm and power LEDs of 3 Watts, transistors, resistors, capacitors a toroidal transformer, a cd power supply and a small solar panel that has three solar cells from 1.5 V to 100 mA when connected in series produces up to 4.5 V.

KEYWORDS: Solar cell, efficiency in solar cells, voltage booster, LED's, oscillator circuit.

INTRODUCCIÓN

En el Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio (ITSAO) se han realizado pruebas con un sistema fotovoltaico instalado que alimenta a lámparas de LED's, sin embargo, al analizar la radiación solar en esta región y el bajo rendimiento actual existente de las celdas solares se llega a considerar que es necesario el desarrollo de circuitos electrónicos que sean capaces de mejorar el aprovechamiento de la energía fotovoltaica. Tomando en cuenta este problema se han realizado pruebas con una con un pequeño panel solar formado por tres celdas solares de 1.5 V.

La conversión de energía solar en electricidad es una respuesta viable para abordar la mayoría de los problemas energéticos del mundo. Entre los parámetros que afectan el rendimiento de las células fotovoltaicas y los sistemas de concentración de energía solar se incluyen su orientación y ángulo de inclinación con respecto al sol [1]. Las preocupaciones sobre el medio ambiente y el aumento de la demanda de energía han llevado al mundo a pensar en fuentes alternativas de energía como la eólica, la hidráulica, la solar y la de combustible. De estos, los sistemas de generación de energía fotovoltaica se han vuelto cada vez más importantes en todo el mundo debido a su disponibilidad, limpieza, bajo costo de mantenimiento y naturaleza inagotable. Pero la energía producida por el sistema fotovoltaico es de naturaleza estocástica debido a la variación de la radiación solar y la temperatura de la celda a lo largo del día [2]. La capacidad de salida de potencia fotovoltaica sigue siendo baja y los costos asociados siguen siendo elevados, por lo que los esfuerzos continúan desarrollando convertidores fotovoltaicos y sus controladores, apuntando a una mayor eficiencia de extracción de energía y rentabilidad [3].

Se propone un diseño potencial de celda solar $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{CdS}$ (CZTS) de alta eficiencia basado en ingeniería graduada de banda prohibida que puede ofrecer los beneficios de un mejor comportamiento de absorción y efectos reducidos de recombinación. exhibe un rendimiento superior, donde se registra una alta eficiencia del 16.9% para la célula solar optimizada con una mejora relativa del 92%, en comparación con la eficiencia de celda de referencia del 8.8%. Del mismo modo, la célula solar CZTS optimizada con un intervalo de banda graduado permite alcanzar un voltaje de circuito abierto mayor de 889 mV, una corriente de cortocircuito de 28,5 mA y un factor de llenado del 66% [4].

Existen más técnicas de optimización y mejora de las celdas solares enfocadas directamente en el material de construcción y el material de la cubierta de cristal para una mejor captación de luz y producción de energía eléctrica como es el caso descrito en [5] que utiliza un software para la simular y optimizar una celda solar orgánica con la extracción de características de Voltaje-Corriente, en [6] que utiliza espejos reflectores y en [7] utilizan reflectores y el enfriamiento de las celdas solares para mejorar su eficiencia manteniéndolo aproximadamente a 25 °C porque por arriba de esa temperatura se reduce el voltaje de circuito abierto disminuyendo su eficiencia.

También se aplican técnicas de circuitos electrónicos como convertidores CC/CC o DC/DC y osciladores para amplificación de voltaje y mejora de la

energía producida por las celdas solares como es el caso de [8] que se enfoca en la utilización de la energía solar para baterías recargables, en [9] desarrollan un circuito de refuerzo CC/CC fue fabricado y probado para su uso con pilas de combustible microbianas (MFC) para aumentar el voltaje operativo típico (100-300 mV) a un voltaje > 3 V. En estado estable, la baja potencia del circuito de refuerzo de voltaje era sostenible, es decir, alimentado solo por los MFC, pero requería una fuente de alimentación externa para iniciar (pero no era necesario para mantener) el oscilador, en [10] se presenta un método novedoso para la puesta en marcha de circuitos sin batería a partir de fuentes de aprovechamiento de energía de voltaje ultrabajo.

Se diseñó y fabricó un circuito de refuerzo de voltaje, con el objetivo de la realización de un sistema monolítico LSI que utiliza una célula solar en chip para eliminar la necesidad de suministro de voltaje externo la celda solar en el chip es de aproximadamente -0.5 V, y se logra obtener un voltaje de alrededor de + 4.0 V [11].

En [12] se propone una cosechadora de energía óptima (OEH) que utiliza un módulo fotovoltaico flexible (FPV) de 19 cm × 4 cm que puede ajustarse fácilmente a los contornos del cuerpo humano se utiliza para generar una potencia máxima de hasta 500 mW para cargar una batería en entornos al aire libre. Para optimizar la energía recolectada bajo varias irradiancias, el OEH está diseñado con un circuito de refuerzo para cosechar la baja energía disponible en el interior y un rastreador de máxima potencia para recolectar la alta energía que está disponible en el exterior. El amplificador puede operar dentro de un amplio rango de voltaje de entrada de 0.65-3 V para generar un voltaje de salida estable de 3.3 V, y tiene una alta eficiencia de conversión de aproximadamente 95%.

Las celdas solares policristalinas de CdS/CdTe tienen en la actualidad una eficiencia fotovoltaica del 20.4% mostrado en el Fist Solar [13]. Con esto aún se considera una eficiencia muy baja.

Se demostró que la eficiencia en las celdas solares de Si cristalino es de 25.6%, las de GaAs en capa delgada es de 28.8%, las de InGaP/GaAs/InGaAs es de 37.9% [14], existen otras tecnologías sin embargo éstos son los niveles más altos que se han logrado y claro por las tecnología de fabricación utilizada el costo es elevado.

Se describe que las celdas monocristalinas presentan una eficiencia aproximada del 14-18%, las policristalinas un 10-15%, las amorfas <10%, las de película delgada aproximadamente 5%, las de GaAs presentan >30% que es un material muy eficiente

sin embargo presenta un elevado costo de fabricación y las de Teluro de Cadmio/Sulfuro de Cadmio (CTS) de 8-10% [15] y [16].

El circuito de prueba de esta investigación es un convertidor cc-cc basado mediante un oscilador que logra incrementar el voltaje de una batería o de una celda solar abasteciendo de energía a LEDs de 5 mm y de potencia; el objetivo es la mejora del aprovechamiento de celdas solares mediante dispositivos electrónicos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño del sistema.

Esta investigación se ha desarrollado en las instalaciones del Laboratorio de Electrónica del ITSAO ubicado en el kilómetro 5.5 de la carretera Acatlán-San Juan Ixcaquixtla, Unidad Tecnológica, Acatlán de Osorio, Puebla.

En el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 1 se desarrolla el proceso de conversión de la energía solar a eléctrica, las celdas solares utilizadas son de 1.5 a 3 Volts este voltaje es acondicionado mediante dispositivos electrónicos para elevarlo a 5, 6 o 12 V y ser transformado a energía luminosa por medio de LED's, también se puede transformar esa energía eléctrica en energía mecánica para la alimentación de pequeños motores de cd.

La unidad de experimentación es un pequeño panel solar capaz de generar 4.5 V a 100 mA al que se le aneja el circuito elevador de voltaje y se le aplican mediciones de voltaje realizadas con un multímetro alimentando LED's de diferentes tipos y colores.

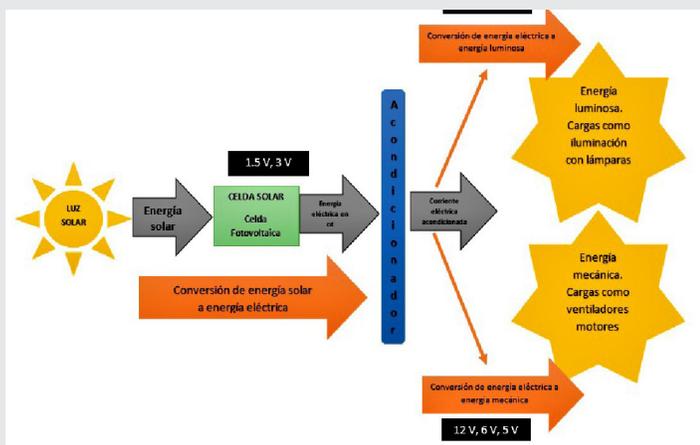


Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento del circuito.

Para empezar, se tomaron en cuenta los esquemas eléctricos de una lámpara solar recargable de advertencia a prueba de agua, de una luz solar de jardín y el de una antorcha con energía solar todos

presentados por [17] que utilizan una técnica de procesamiento de la energía solar mediante transistores, capacitores, resistores, inductores, diodos y LED's casos muy relacionados con lo que se desarrolla en este trabajo, se muestran en las Figuras 2, 3 y 4; el voltaje proporcionado por las cuatro celdas solares conectadas en serie es de 4.5 V en los tres casos.

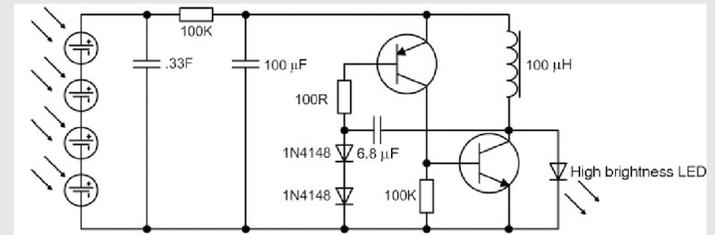


Figura 2. Esquema de luz solar de advertencia a prueba de agua.

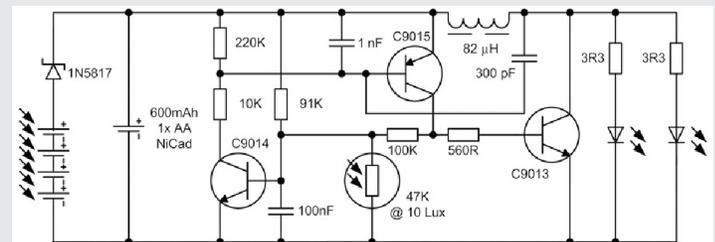


Figura 3. Esquema de luz solar de jardín.

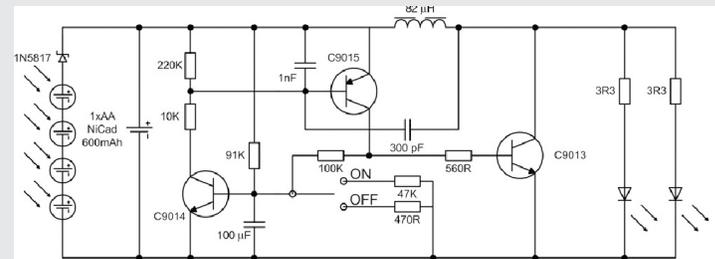


Figura 4. Esquema de antorcha con energía solar.

Z. Kaparnik publicó en 1999 tres circuitos de accionamiento para el funcionamiento de los LED a partir de tensiones de alimentación inferiores a 1,5 V donde el funcionamiento es basado en un oscilador de bloqueo [18] los esquemas se muestran en la Figura 5.

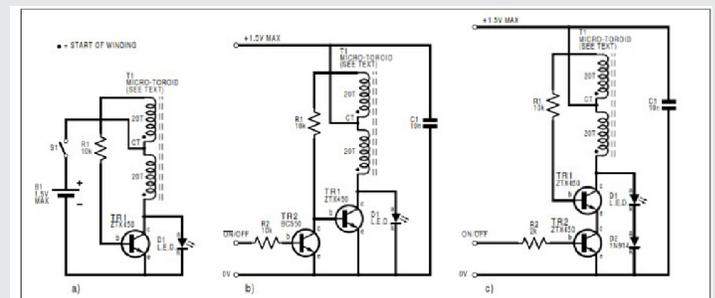


Figura 5. Circuitos de accionamiento para el funcionamiento de los LED a partir de tensiones de alimentación inferiores a 1,5 V [5].

Figura 5. Circuitos de accionamiento para el funcionamiento de los LED a partir de tensiones de alimentación inferiores a 1,5 V.

Son los principales esquemas en los que se ha basado esta investigación.

Construcción del circuito.

En el desarrollo del estudio de esta investigación se utilizaron componentes electrónicos principales como un transistor 2N3055, un capacitor electrolítico de 68 microfaradios (μF) a 420 Volts (V), capacitores cerámicos, un transformador toroidal, un diodo rectificador y un potenciómetro; como equipo para la experimentación se utilizó una fuente de voltaje de corriente directa (cd) y un multímetro digital.

En la Figura 6 se observa el circuito armado conectado a una fuente de cd utilizando como carga tres LED's para verificar el funcionamiento. Un LED no enciende con 1.5 V, sin embargo, con el circuito agregado logra encender los de 5 mm de una manera aceptable y al incrementar el voltaje de entrada hasta 3 V se logran encender hasta LED's de 3 W.

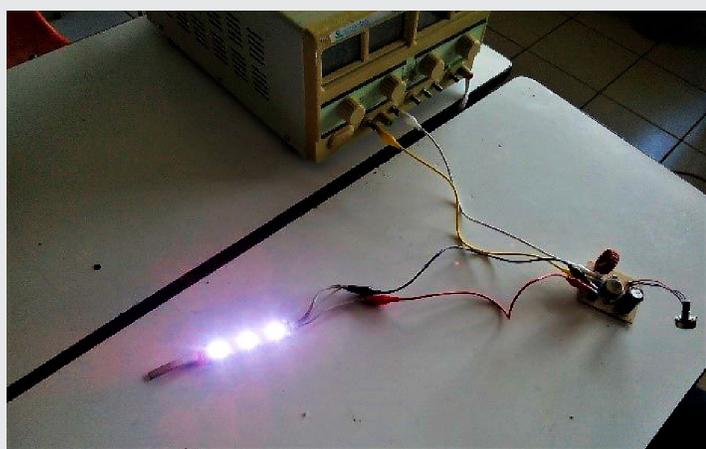


Figura 6. Circuito armado y conectado.

RESULTADOS

La fuente de alimentación se ajustó a 2.8 V como se muestra en la Figura 7 logrando encender los tres LED's con una corriente de 1.59 Amperes (A) mostrados en los display's de la fuente.

En la Figura 8 se muestra que se logra elevar el voltaje hasta 40.4 V sin conexión de la carga.

En la Figura 9 se muestra una elevación de 32.9 V que resultan al ajustar el valor con el potenciómetro.

En la Figura 10 se muestra una elevación de 27.8 V ajustados.

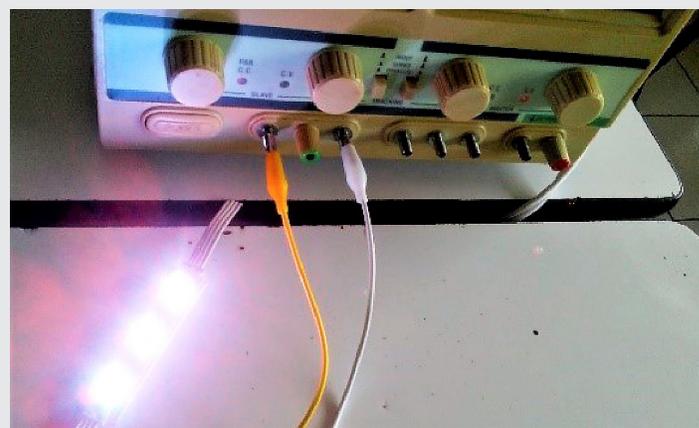


Figura 7. Prueba a 2.8 V.

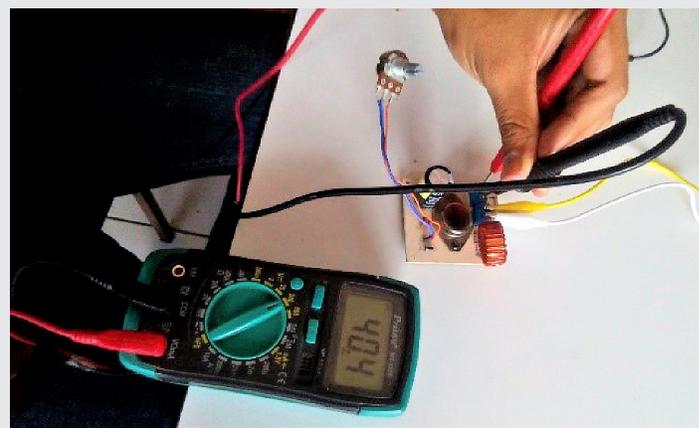


Figura 8. Elevación del voltaje hasta 40.4 V.

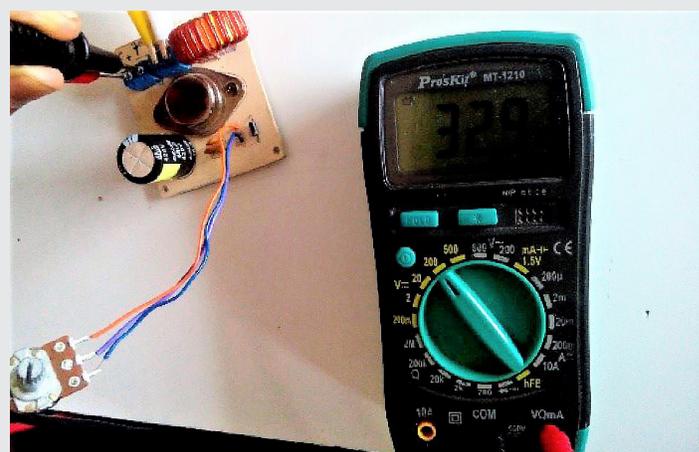


Figura 9. Elevación del voltaje hasta 32.9 V.

ganic solar cell,» *Optik*, vol. 157, nº 6, pp. 924-929, 2018.

the Evil Genius 50 Build-It-Yourself Projects, United States of America: McGrawHill, 2009.

[6] S. M. I. S. I. R. G. Jee Joe Michael, «Enhanced electrical performance in a solar photovoltaic module using V-trough concentrators,» *Energy*, pp. 605-613, 2018.

[18] Z. Kaparnik, «vampire torch,» *EPE Everyday Practical Electronics*, 1999.

[7] A. Sheikh Md Shahin y M. R. A.N.M., «Performance comparison of mirror reflected solar panel with tracking and cooling,» *IEEE Conferences, 2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (IC-DRET)*, pp. 1-4, 2016.

[8] Y. S. G. H. Z. Qi Lib, «Solar energy storage in the rechargeable batteries,» *Nanotoday*, vol. 16, nº 5, pp. 46-60, 2017.

[9] J. C. B. L. A. F. B. R. R. Peter K. Wu, «A low power DC/DC booster circuit designed for microbial fuel cells,» *Process Biochemistry*, vol. 47, nº11, pp. 1620-1626, 2012.

[10] A. R. E. M. M. Antonio Camarda, «A 32 mV/69 mV input voltage booster based on a piezoelectric transformer for energy harvesting applications,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 232, nº 12, pp. 341-352, 2015.

[11] T. Kimura y H. Ochi, «A -0.5V-input voltage booster circuit for on-chip solar cells in 0.18 μ m CMOS technology,» *IEEE Conferences 2015 15th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pp. 193-196, 2015.

[12] T. Thang Viet y C. Wan-Young, «High-Efficient Energy Harvester With Flexible Solar Panel for a Wearable Sensor Device,» *IEEE Sensors Journal*, pp. 9021-9028., 2016.

[13] *First Solar*, 25 Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://investor.firstsolar.com/news-releases/news-release-details/first-solar-sets-world-record-cdte-solar-cell-efficiency>.

[14] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta y E. D. Dunlop, «Solar cell efficiency tables (Version 45),» *Progress in Photovoltaics*, pp. 1-9, 2014.

[15] J. Roldán Vilorio, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, 1ra ed., Madrid, España: Paraninfo, 2010.

[16] M. Á. Sanchez Maza, *Energía Solar Fotovoltaica*, México: Limusa, 2012.

[17] G. D. J. Harper, *Solar Energy Projects for*



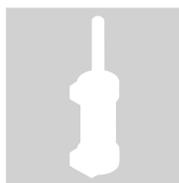
Tierra,
Medio Ambiente
y Energía

Ingeniantes

Diseño de un cilindro neumático de CPVC, con potencial para su uso en exoesqueletos mecánicos de bajo costo

RESUMEN: En los últimos años algunas organizaciones han apostado por el desarrollo de exoesqueletos, enfocados en el mejoramiento o asistencia de la movilidad y en casos de rehabilitación; en estos, el diseño de bajo costo, los materiales y las técnicas de fabricación juegan un papel importante. En este trabajo se presenta el diseño de un cilindro neumático de CPVC, se realiza un análisis por el método de elemento finito para determinar su viabilidad como actuador en exoesqueletos mecánicos de mayor asequibilidad. Para asegurar lo anterior se han considerado los estudios estáticos lineales, no lineales, factor de seguridad y fatiga, con el fin de comprobar la distribución de esfuerzos, las deformaciones máximas, su nivel de seguridad, su vida útil y el porcentaje de daño provocado por el número de ciclos de operación. Los resultados obtenidos indican que es factible utilizar el CPVC como material potencial para la manufactura de actuadores neumáticos, reduciendo con ello el costo de los componentes y costo de manufactura comparado con el de tecnologías para el mismo fin, extendiendo con ellos el catálogo de opciones para obtener un cilindro neumático funcional que amplía la cobertura de aplicaciones en el mercado.

PALABRAS CLAVE: Análisis, Cilindro neumático, CPVC, Exoesqueleto, MEF.



Colaboración

Marcos López González; Erick Gómez Hernández; Uzias Edrei Cortes Sánchez; Daniel Márquez Trejo; Luis Alberto Villaseñor Rivera, Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla

ABSTRACT: In recent years some organizations have opted for the development of exoskeletons, focused on the improvement or assistance of mobility and in cases of rehabilitation; in these, low-cost design, materials and manufacturing techniques play an important role. In this paper the design of a pneumatic cylinder of CPVC is presented, an analysis by the finite element method is performed to determine its viability as an actuator in mechanical exoskeletons of greater feasibility. In order to assure the above, linear, nonlinear static studies, safety factor and fatigue have been considered, in order to verify the distribution of stresses, the maximum deformations, their safety level, their useful life and the percentage of damage caused by the number of cycles of operation. The results obtained indicate that it is feasible to use CPVC as a potential material for the manufacture of pneumatic actuators, thereby reducing the cost of components and manufacturing cost compared to that of technologies for the same purpose, thus extending the catalog of options for obtain a functional pneumatic cylinder that extends the coverage of applications in the market.

KEYWORDS: Analysis, Pneumatic cylinder, CPVC, exoskeleton, FEA.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con datos mostrados en INEGI 2014, tan sólo 7.1 millones de habitantes a nivel nacional sufre algún tipo de discapacidad, esto es el 6% del total de la población, por lo que podemos también saber que el 64.1% de estos habitantes vive con la discapacidad de caminar, subir o bajar usando sus piernas [1]. Otro factor importante es la edad, ya que de 1990 a 2017 la población de adultos mayores aumento del 6.4% al 10.5% y se

espera que en el 2050 aumente al 21.5% del total de habitantes [2], por lo que el uso de exoesqueletos para atender esta discapacidad podría aumentar al paso del tiempo, esto requerirá el uso de materiales alternativos en la construcción de las diferentes partes de estos mecanismos, lo que ayudará a reducir el costo de los exoesqueletos. Dentro de los elementos más importantes se encuentran los cilindros o actuadores por lo que esta propuesta busca reducir el costo a través de la manufactura de estos con nuevos materiales como el CPVC, lo que haría más asequible la obtención de un exoesqueleto. En las últimas décadas empresas e instituciones educativas de nivel superior como UNAM, IPN, CINVESTAV, ITESM - INDI Ingeniería y Diseño - WeaRobot, entre otros [3-6]; han incursionado en la fabricación de dispositivos que asisten el movimiento de las extremidades del cuerpo, tal es el caso de los exoesqueletos, donde el movimiento del mecanismo se obtiene mediante la implementación de actuadores lineales, este hecho repercute directamente en el costo de cada dispositivo. En el caso que se presenta es esencialmente importante la tecnología neumática ya que se diseña un actuador lineal a base de un material termoplástico. El CPVC puede ser incursionado como material de manufactura, ya que comparado con un cilindro de características similares manufacturado por las marcas más reconocidas en el país tiene un costo de apenas el 25% y bien puede ser utilizado en el desarrollo de diversos exoesqueletos para extremidades inferiores o para extremidades superiores [7].

El sistema de movimiento presentado por Homayoon Kazerooni et al [8], donde el dispositivo lleva el nombre de pierna generadora de energía Figura 1.

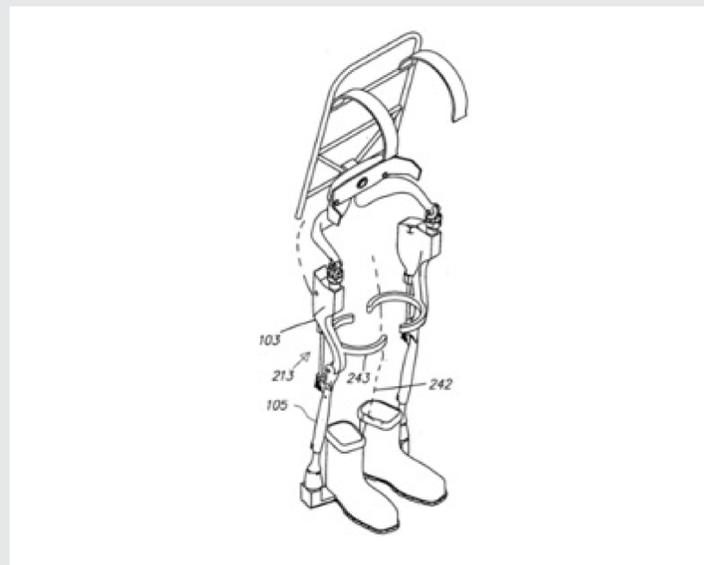


Figura 1. Exoesqueleto "Pierna Generadora de energía", Patente con número de publicación CA2645319 A1.

Consta de un conjunto de eslabonamientos verticales enlazados, donde el movimiento se realiza a través de un enlace partiendo de una sujeción del actuador a la altura de la cadera dirigido hacia el extremo inferior del mecanismo de la rodilla. El vástago del actuador queda de enlace entre estos dos elementos donde permite la flexión y extensión de los movimientos de dicho muslo y enlace del vástago con respecto al otro; consta de igual manera de un soporte lumbar y sujeciones para adaptarse al cuerpo humano.

Otro sistema de exoesqueleto es el desarrollado por Nathan Harding et al [9], se compone por un soporte lumbar conectado a un primer y segundo soporte de la pierna, posee actuadores que permiten el movimiento en la cadera, un soporte lumbar con contrapeso que incluye una masa auxiliar al exoesqueleto, de igual manera posee actuadores en las articulaciones de rodilla para llevar a cabo la extensión y flexión del miembro.

El exoesqueleto de extremidad inferior propuesto por Homayoon Kazerooni et al [10], propone un sistema configurable para ser acoplado a una persona, incluye soportes de piernas y está diseñado para descansar en el suelo durante las fases de postura, cada soporte tipo actuador tiene un enlace del muslo y un enlace de vástago Figura 2.



Figura 2. Exoesqueleto "Dispositivo y método para disminuir el consumo de energía de una persona, mediante el uso de un exoesqueleto de extremidad inferior", Patente con número de publicación WO/2009/143161.

Este exoesqueleto cuenta con dos articulaciones de rodilla, cada uno configurados para permitir la flexión, los actuadores de la cadena están situados en posición opuesta al eslabonamiento del muslo, el tronco de exoesqueleto es adaptable a la parte superior del cuerpo de usuario. Otro caso de un exoesqueleto de

extremidad inferior fue desarrollado por Little Richard e Irving Robert Alexander [11] Figura 3. Este sistema comprende un miembro de soporte rígido con un arnés pélvico y un par de eslabones de soporte de la pierna, consta de un actuador situado en la cadera, un actuador de rodilla y un actuador de pie principal.

Etapa 4. Resultados y conclusiones.

Se discute el comportamiento mostrado por el cilindro propuesto bajo la carga seleccionada, se discuten los beneficios esperados con el diseño propuesto y se concluye con el análisis de los datos arrojados por los estudios aplicados Figura 4..

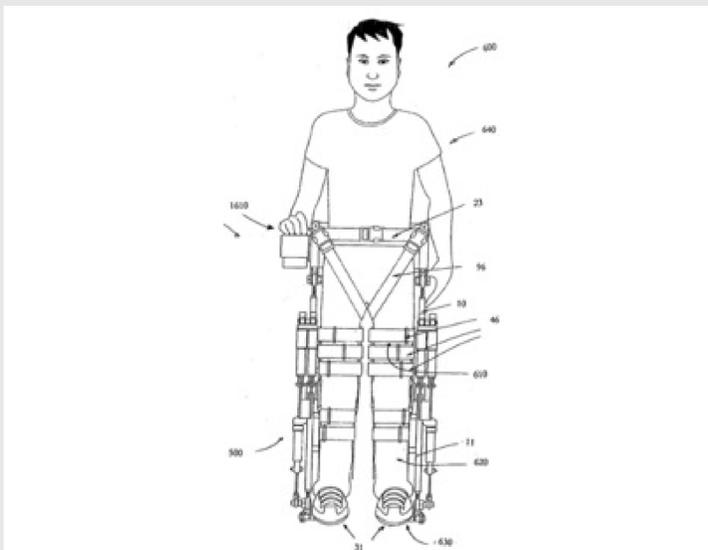


Figura 3. Exoesqueleto "Exoesqueleto de alimentación autónoma para un usuario con discapacidad", Patente con número de publicación US20110066088 A1.

METODOLOGÍA

Con la finalidad de cumplir con la propuesta presentada en este trabajo, se expone el desarrollo secuencial de las siguientes etapas:

Etapa 1. Comparación técnica del Al y el CPVC.

Con la comparación entre el aluminio y el CPVC bajo un criterio técnico y económico, se pretende dar a conocer las características con las cuales se trabajará en las secciones posteriores, así como la diferencia entre los precios actuales en el mercado local de ambos materiales.

Etapa 2. Propuesta del actuador lineal.

Se procede a realizar la propuesta de diseño definitivo del actuador lineal. Se editan las propiedades del material analizado, asignando las características mecánicas necesarias tales como: Módulo de Young, Módulo de Poisson y Limite elástico, entre otros. Se ha elegido el software SolidWorks® como herramienta de diseño y análisis.

Etapa 3. Caracterización y condiciones de frontera.

Con el diseño esquemático definitivo se procederá a explicar las condiciones generales bajo las cuales se ensayará el actuador neumático propuesto, considerando sus condiciones de trabajo y su aplicación potencial.

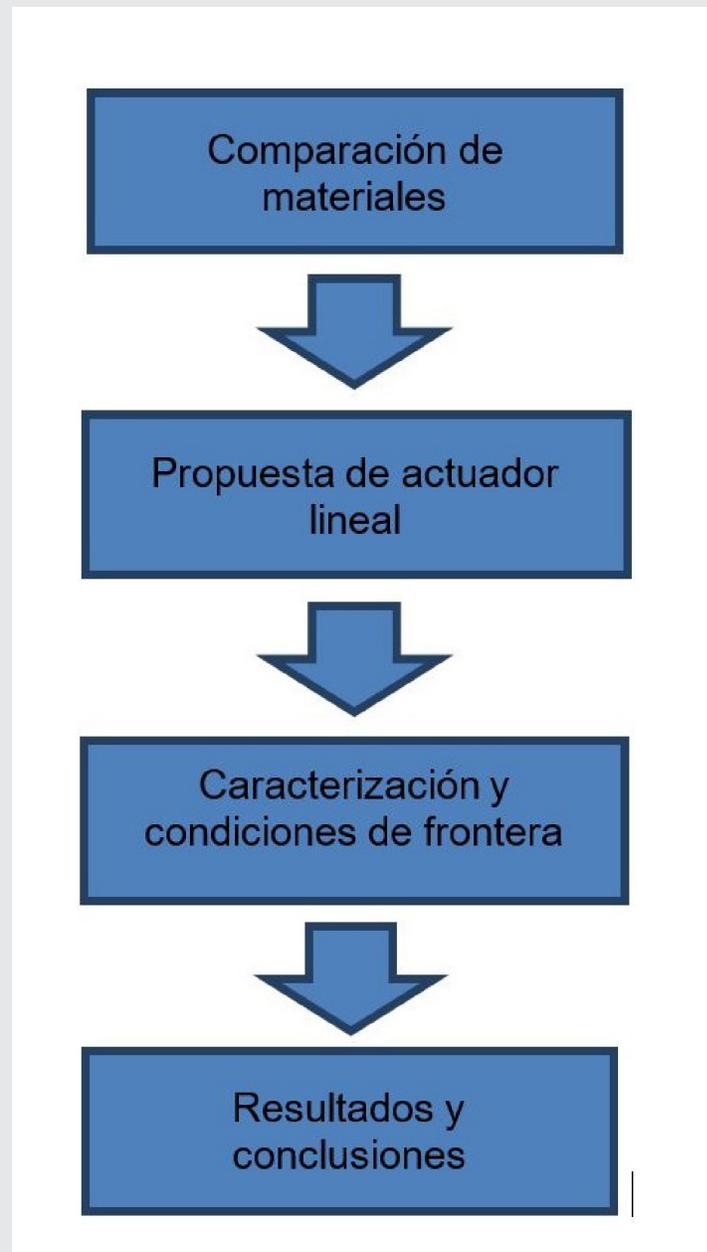


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso metodológico.

RESULTADOS

Comparación de materiales

Para la manufactura de los actuadores lineales se decidió comparar al aluminio con respecto al CPVC debido a que el aluminio es empleado con frecuencia en la manufactura de actuadores lineales de tecnología neumática. Los materiales anteriores se compararon con base en dos criterios: costo y resistencia mecánica.

Tabla 1. Comparativo de propiedades mecánicas y precio del CPVC – Aluminio.

Propiedades mecánicas	CPVC	Aluminio	Unidades
Módulo Elástico	2500	6900	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.365	0.33	N/D
Módulo Cortante	318.9	27000	N/mm ²
Densidad de masa	1560	2700	kg/mm ³
Límite de tracción	55	68.9356	N/mm ²
Límite de compresión	70	-	N/mm ²
Límite elástico	300	27.5742	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	0.61	2.4e-005	/K
Conductividad térmica	0.14	200	W/m*K
Calor específico	1386	900	J/kg*K
Costo por pieza	150.00 / 6 metros	160.00/1m	MNX

Con base en los datos que se presentan en la Tabla 1 se pueden identificar a priori dos características fundamentales para el estudio. La primera de ellas muestra que la diferencia en el módulo elástico del CPVC representa un 36% del valor correspondiente al aluminio, mientras que el límite elástico de CPVC es 10.8 veces mayor comparado con el aluminio. Lo anteriormente descrito muestra que la relación de características del termoplástico que se presenta y sus ventajas como material en instalaciones hidráulicas, tales como su equilibrio entre resistencia y flexibilidad, aceptable resistencia a altas presiones por tiempos prolongados, alta resistencia a la corrosión, su bajo peso en comparación con el aluminio, su aceptable resistencia a la tracción y el impacto y su bajo costo [12]; pueden favorecer la respuesta del material en la aplicación que se propone.

Propuesta de actuador lineal.

El actuador neumático se diseñó de acuerdo con la carga de trabajo, la cual se propuso en función de un estudio realizado por la CANAIVE (2012) [13], en donde se obtiene el peso promedio de 78.4 kg para un mexicano que radica en la zona centro del país. El peso considerado para el estudio es superior al ob-

tenido por la CANAIVE, siendo este de 100 kg, la razón radica en la posibilidad de que del 2012 a la fecha el peso de una persona puede haber incrementado notablemente. Sumado a lo anterior, de acuerdo con Creus [14] se ha considerado un incremento al valor de la fuerza teórica calculada debido al rozamiento del pistón en su movimiento, el cual equivale a un valor comprendido entre el 3% y 10%.

Para determinar el diámetro del émbolo se utilizó la Ec. (1) [15] y en seguida se calculó el diámetro del vástago considerando el esfuerzo límite de tracción con Ec. (2), posteriormente se calculó la magnitud de su elongación con Ec. (3), para asegurar que su incremento de longitud es aceptablemente pequeño, con lo anterior se procedió a seleccionar su dimensión nominal del catálogo de perfiles tubulares comerciales de EMMSA [8].

$$F = P_{aire} * \pi * \left(\frac{D^2}{4}\right) \tag{Ec(1)}$$

Donde:

F: Fuerza en Newton [N].

D: Diámetro del émbolo [m].

Paire: Presión del aire [Pa].

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{Ec(2)}$$

Dónde:

σ : Esfuerzo [Pa]

F: Fuerza [N]

A: Área [m²]

$$\delta = \frac{F * L}{A * E} \tag{Ec(3)}$$

Dónde:

δ : Incremento de longitud [m]

F: Fuerza [N]

L: Longitud inicial [m]

E: Módulo de Young [Pa]

A: Área [m²]

Con base en los cálculos realizados con Ec. (3), se determinó que el incremento de longitud es de 2.03E-03 mm, lo que se ha considerado aceptable para la aplicación propuesta, tomando en cuenta que los procesos de manufactura convencionales de torneado y fresado pueden proporcionar precisiones de maquinado de 1E-03 in o bien 1E-02 mm. En la Tabla 2 se resumen las características del actuador lineal. Las dimensiones mostradas corresponden a los valores comerciales más cercanos a los calculados, encontrados en el catálogo de EMMSA para tuberías de CPVC cédula 80.

Tabla 2. Dimensiones del actuador de doble efecto.

Características	Dimensiones
Diámetro interior de la camisa del actuador	2 in
Diámetro émbolo	2 in
Diámetro vástago	0.5 in
Longitud útil del vástago.	4 in
Carrera requerida del vástago.	4 in
Factor de pandeo	2

Con relación a las características y dimensiones obtenidas se propuso el esquema definitivo mostrado en la Figura 5. La camisa, el émbolo, las bridas y el vástago están simulados en CPVC.

Del esquema propuesto en la Figura 6 se muestra un despiece del actuador lineal, mostrando las diferentes partes que lo conforman.

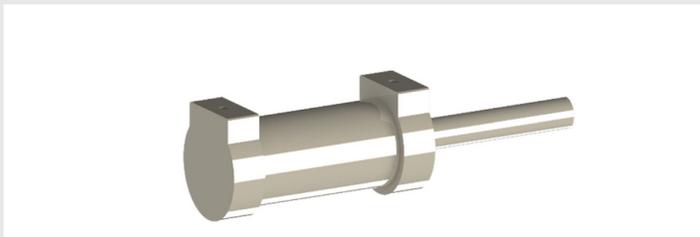


Figura 5. Actuador lineal esquema definitivo.

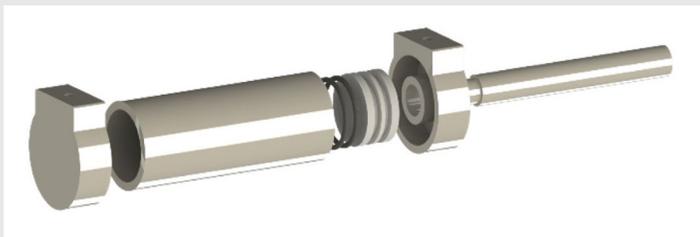


Figura 6. Despiece de actuador lineal.

Caracterización y Condiciones de Frontera.

Una vez desarrollado el diseño esquemático definitivo se procede a realizar los análisis computacionales de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, factor de seguridad y vida útil para determinar el comportamiento del cilindro neumático propuesto. Las condiciones generales de mallado para todo el ensamble se muestran en la Tabla 3, por considerar que hay componentes críticos en el ensamble se han considerado dos niveles de mallado.

Tabla 3. Características generales de mallado para el análisis estático.

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	Desactivar
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	0 mm
Tamaño mín. de elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	347066
Número total de elementos	219717
Cociente de aspecto máximo	7.0463
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.9
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	100
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:07
Nombre de computadora	

La discretización del cilindro propuesto se ha resuelto previendo una mayor concentración de esfuerzos en la camisa y el vástago del cilindro. Lo anterior tiene fundamento en el hecho de que será el vástago el encargado de movilizar la carga asignada en este caso de estudio, mientras que la camisa será la más expuesta a la presión de trabajo de 6 bar; por lo que se ha decidido dividir el ensamble en dos grupos de componentes, identificados en la Tabla 4 como primarios y secundarios; por una parte, para el grupo A compuesto por el vástago y la camisa se ha optado por un mallado fino, mientras que para el resto de los componentes pertenecientes al grupo B se ha asignado una malla más gruesa.

Tabla 4. Detalle de las características por grupo de los controles de malla aplicados al modelo. (a) Mallado para elementos secundarios. (b) Mallado para elementos primarios.

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	5 componente(s)
Unidades	mm
Tamaño	7.98161
Coefficiente	1.5
Identificador	1

(a)

Nombre de estudio	Análisis estático Cilindro CPVC (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	2 componente(s)
Unidades	mm
Tamaño	5.34429
Coefficiente	1.5
Identificador	2

(b)

En la Figura 7 se han representado las diferentes condiciones de la simulación, tales como la distribución uniforme de la fuerza que ejerce el peso máximo propuesto, que se aplica al extremo libre del vástago.

Se eligieron fijaciones en las bridas para facilitar el proceso de simulación. Se ha considerado también la acción de la gravedad y la presión interna de 6 bar.

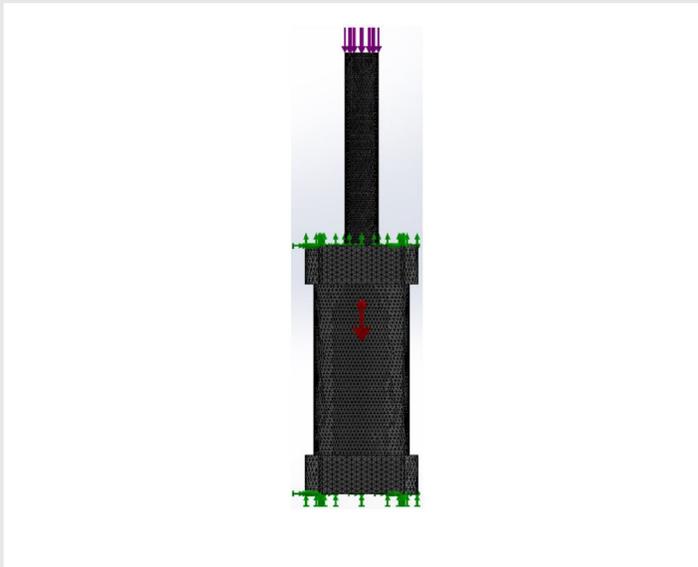


Figura 7. Discretización del modelo. Se presenta la aplicación del control de mado. Un mado más fino ha sido aplicado a la camisa y al vástago.

El comportamiento observado en la Figura 8 corrobora una distribución promedio de los esfuerzos que va de $2.4 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ predominantemente en la camisa, a $4.1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ con mayor presencia en el vástago. La brida superior e inferior no presentan una respuesta evidente, lo cual corresponde con el comportamiento esperado y justificando con ello la diferenciación de la malla aplicada. En la parte interna del asiento del vástago se han distribuido los esfuerzos desde el promedio presentado en el vástago hasta el valor mínimo mostrado en la escala de valores. Puede considerarse que el cilindro se esfuerza en un rango aceptable.

Los desplazamientos provocados por la carga asignada tienen su mayor magnitud en $2.86 \times 10^{-1} \text{ mm}$, localizándose en la zona de aplicación. Esta magnitud disminuye gradualmente hasta presentar valores promedio de $9.0 \times 10^{-2} \text{ mm}$ principalmente en el émbolo. Lo anterior demuestra que tanto el material como el diseño general del cilindro responden satisfactoriamente al trabajo asignado Figura 9.

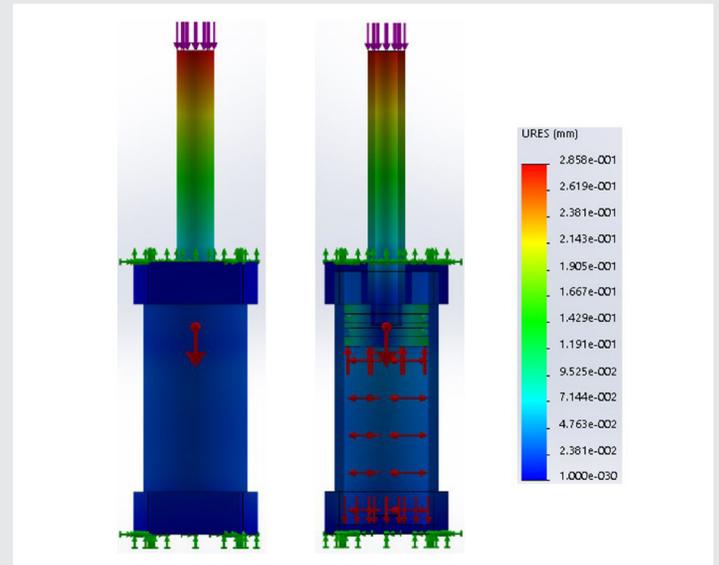


Figura 9. Detalle interno de las zonas en que se presenta una mayor concentración de esfuerzos.

Como parte del estudio estático se obtuvieron los resultados de la distribución del factor de seguridad (FDS) mostrado en la Figura 10. Se confirmó la eficiencia del diseño propuesto, al obtener valores promedio de 3.07×10^1 para todos los componentes.

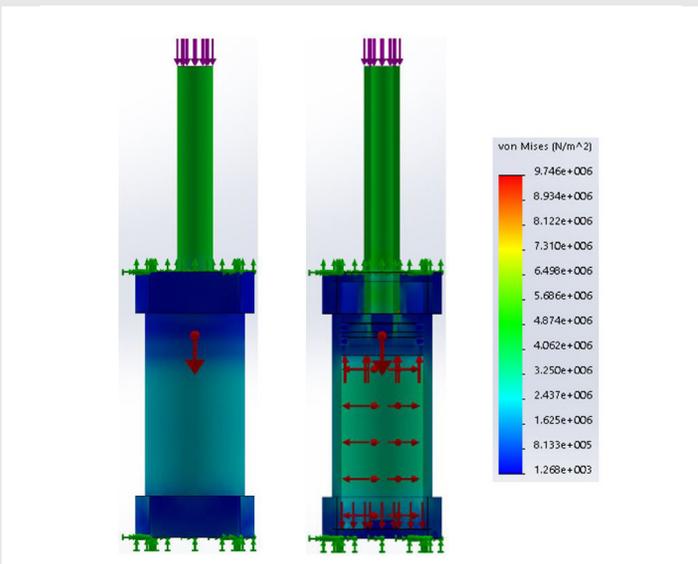


Figura 8. Distribución de esfuerzos Von Mises.

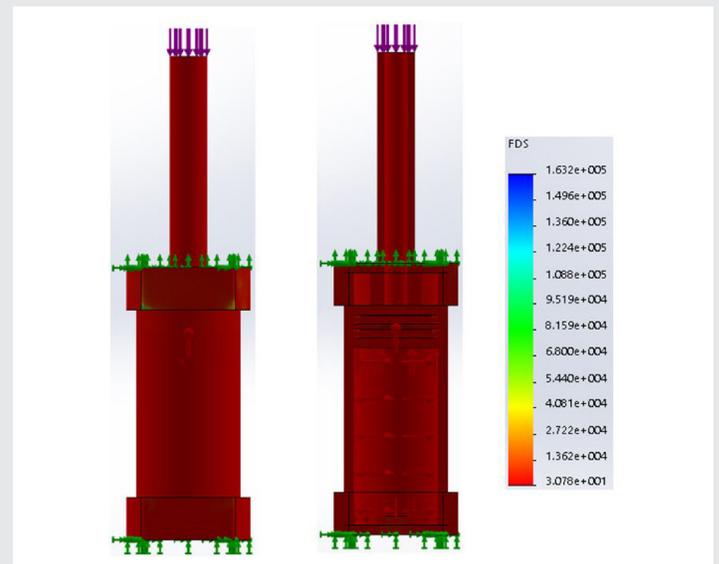


Figura 10. Resultados de la distribución del factor de seguridad.

Hasta esta etapa del análisis todos los resultados obtenidos muestran un comportamiento favorable del cilindro bajo las condiciones de carga máxima aplicada. Sin embargo, se ha considerado extender el estudio estático a un análisis dinámico para obtener el comportamiento del sistema bajo condiciones de fatiga.

En la Figura 11 se presenta el resultado del estudio dinámico a partir de las condiciones de frontera del estudio estático. En (a) se obtuvieron desplazamientos máximos de $1.45e-03$ mm mientras que la distribución de esfuerzos Von Mises muestra un valor medio predominante de $2.6e+03$ N/m² y con mayor presencia en el vástago. Ambos estudios confirman un diseño estable bajo las condiciones seleccionadas inicialmente.

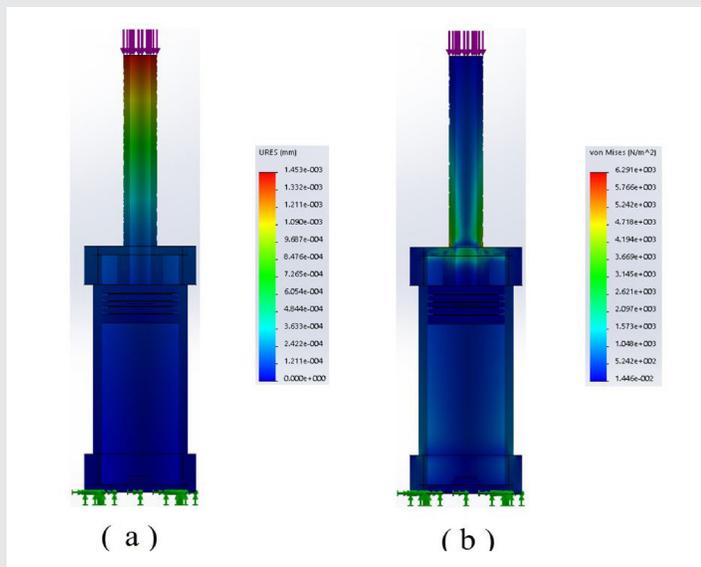


Figura 11. Resultados del análisis dinámico.
(a) Estudio de desplazamientos.
(b) Estudio de Esfuerzos Von Mises.

Para desarrollar el estudio de fatiga se realizó un análisis dinámico mediante sucesos de amplitud constante y ciclos definidos, de donde se ha obtenido la gráfica mostrada en la Figura 12.

Se ha considerado importante el estudio de fatiga para determinar la vida útil Figura 13 y el porcentaje de daño del sistema, proponiendo un uso promedio de 15768000000 ciclos de trabajo. La cantidad de ciclos se estimó a partir de una frecuencia de 1 ciclo por segundo para aplicaciones generales, garantizando su integridad por cinco años.

En la Figura 13 se puede observar que, para la cantidad de ciclos mencionada con anterioridad, se puede asegurar que la camisa presenta una vida útil muy por encima de lo esperado, y aunque el vástago tiende a mostrar un número inferior, este tiene un valor promedio de 10 veces mayor al estimado. Lo anterior

asegura un desempeño óptimo y confiable para su aplicación ininterrumpida con la frecuencia propuesta y con la carga máxima considerada.

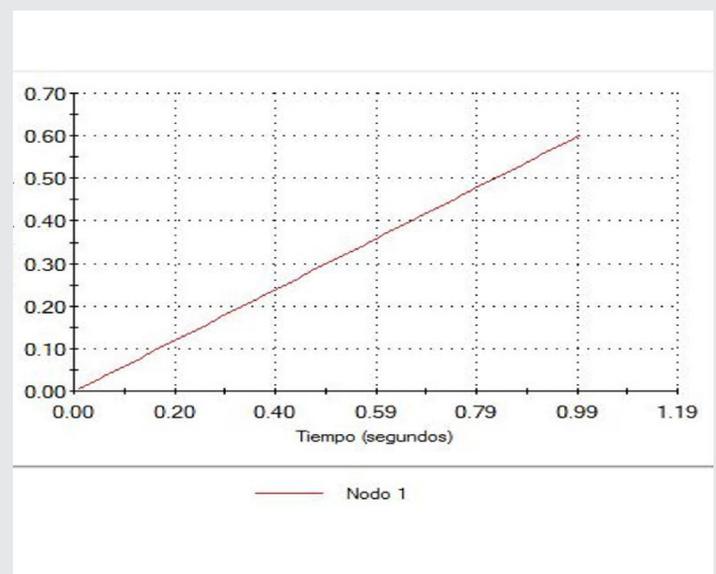


Figura 12. Información complementaria que muestra la relación $\sigma - t$ del estudio dinámico.

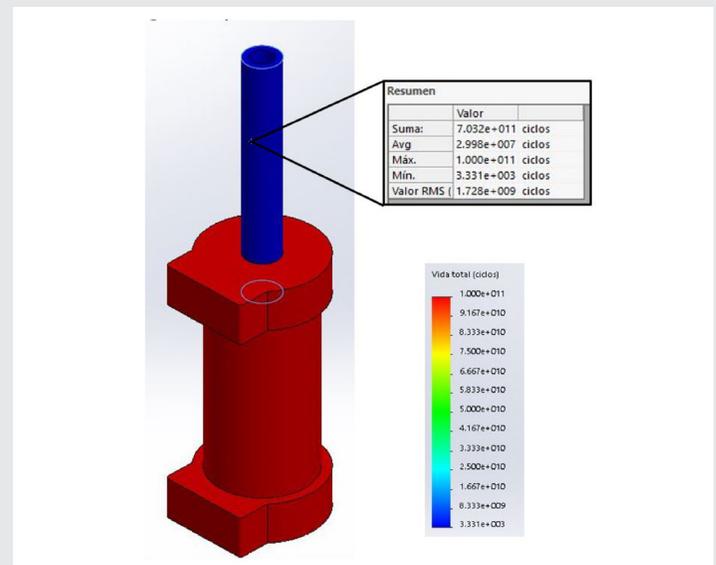


Figura 13. Resultados del estudio de Fatiga. Vida Útil.

En la Figura 14 se corrobora que el cilindro diseñado presenta un porcentaje de daño mínimo en el periodo de trabajo propuesto. En general el estudio de fatiga demuestra la aplicabilidad segura para propósitos generales en un periodo de 5 años, con frecuencia de 1 ciclo por segundo.

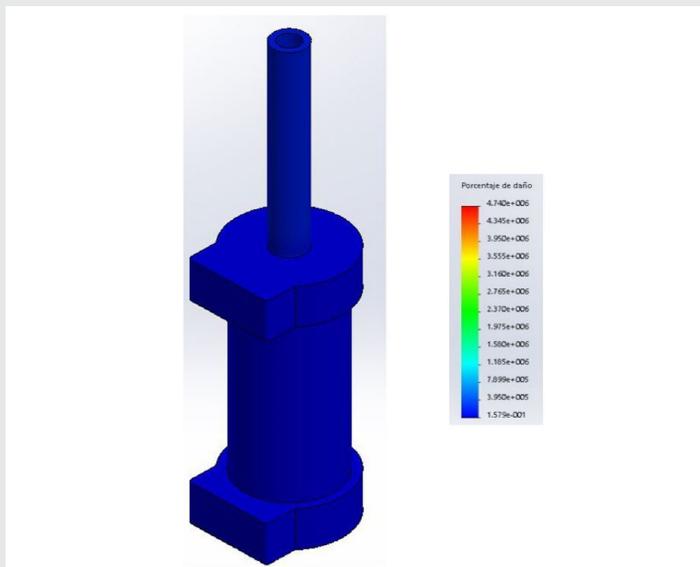


Figura 14. Resultado del estudio de fatiga. Porcentaje de daño.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran implícitamente una relación costo-beneficio de alta rentabilidad, para su manufactura y aplicación en diferentes sectores, tales como: Productivo, educativo y de rehabilitación. Dentro del ámbito de la rehabilitación se puede aportar a la asequibilidad de diversas prótesis que requieren uno o más de estos actuadores lineales, lo que abre la posibilidad de utilizar nuevos materiales para el desarrollo de estos componentes.

BIBLIOGRAFÍA

[1] La discapacidad en México, datos al 2014 (2016). INEGI. Obtenida 16 de abril de 2018. https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz_P28t7_aAhWlu1MKHfobBL4QFgg2MAE&url=http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825090203.pdf&usg=AOvVaw24m1L-FZXJi-y71BdrskUJM

[2] Estadísticas a propósito del día mundial de la población, (2017) INEGI. Obtenida 16 de abril de 2018. http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/poblacion2017_Nal.pdf

[3] Luna, M. M.; Rodríguez, C. A. (2015). Diseño Mecánico de un exoesqueleto de cadera y rodilla. México D. F.: Autor.

[4] Ayala, J. F. (2015). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. Revista Colombiana de Biotecnología, 17

(1). Consultada 16 de abril de 2018. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/44188/51976>

[5] Parga, C. R. (2018). Diseño de un exoesqueleto para hombro humano y controlado por su modelo de movimiento. Ciudad de México: Autor. <http://www.ctrl.cinvestav.mx/xyuw/pdf/DoCP.pdf>

[6] Mexicanos desarrollan exoesqueletos para rehabilitación (2015). Obtenida 16 de abril de 2018, de la página electrónica: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/techbit/2015/09/10/mexicanos-desarrollan-exoesqueletos-para-rehabilitacion>.

[7] Chávez M. A., Rodríguez F., Baradica A. "Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación". Revista Ingeniería Biomédica, volumen 4, número 7, enero-junio (2010), págs. 63-73.

[8] Homayoon Kazerooni., Adam Zoss., Nathan Harding y Russdon Angold., (2011). US 11-716,135., Power generating leg, US7883546 (B2). Lugar: Estados Unidos., Espacenet.

[9] Nathan Harding, Kurt Amundson, Jon Burns, Russdon Angold, Adam Zoss y Homayoon Kazerooni, (2013). US 13/639,984., Exoskeleton load handling System and Method of Use., US2013303950 (A1). Lugar Estados Unidos, Espacenet.

[10] Homayoon Kazerooni., Kurt Amundson y Nathan Harding, (2015). US 14/605,343, Device and Method for Decreasing energy Consumption of a Person by Use of a Lower Extremity Exoskeleton., US2015134078 (A1), Lugar: Estados Unidos, Espacenet.

[11] Little Richard y Irving Robert Alexander, (2011). US 12/801,809, Self contained powered exoskeleton walker for a disabled user, US2011066088 (A1), Lugar: Estados Unidos, Espacenet.

[12] Diferencia entre tuberías PVC y CPVC, (2016) Expotile. Obtenida el 16 de abril de 2018. <http://expotile.com.mx/diferencia-entre-tuberias-pvc-y-cpvc/>

[13] CANAIVE (2012).

[14] Creus A., Enero (2011), Neumática e hidráulica, México, Alfaomega Grupo Editor.

[15] Primaflow., Sistema de tuberías y conexiones CPVC, México, (Consultado el 17 de marzo de 2017).



Mecánica
de
Materiales

Ingeniantes

Estudio experimental de los efectos de la soldadura en pruebas de crecimiento de grieta en PTR de acero AISI 1020



Colaboración

José Luis Ramírez Cruz, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco; José Emiliano Martínez Ordaz, Universidad Iberoamericana, Santa Fe

RESUMEN: En este trabajo se presentan resultados de una investigación sobre la propagación de grietas por fatiga en lámina de acero estructural, sometida a un proceso de soldadura MIG. El estudio se realizó en el acero estructural utilizado en la fabricación de estructuras, de perfil tubular rectangular (PTR) de 2 x 1 pulg. y 2 mm de espesor, con y sin cordón de soldadura, debido a fallas que se detectaron en una estructura de un camión de pasajeros. El maquinado de las probetas diseñadas fue por medio de electroerosión por hilo. Se realizaron 12 pruebas de propagación de grietas por fatiga en material base y soldado. Los resultados muestran una detención de grieta en la zona afectada por el calor, requiriendo mayor amplitud del factor de intensidad de esfuerzos con un valor de $50 \Delta K$ para que la grieta se propague de una manera estable hasta alcanzar una longitud de 23 mm para después terminar la prueba. Los resultados muestran que la combinación de microestructura y los esfuerzos residuales en la zona afectada por el calor son los que predominan en el comportamiento de la grieta en el material soldado.

PALABRAS CLAVE: Grieta, fatiga, esfuerzo, soldadura, lámina.

ABSTRACT: This paper presents results of research on the propagation of fatigue cracks in structural steel sheet, subjected to a MIG welding process. The study was conducted on structural steel used in the manufacture of structures of rectangular tubular profile (PTR) for 2 x 1 inch and 2 mm thick, MIG welded and non welded, due to failures that were detected in a structure of a passenger truck. The machining of the designed specimens was by means of wire EDM. 12 Samples were tested for fatigue crack propagation at the base material and welded metal. The results show a crack arrest in the heat affected zone (HAZ), requiring greater amplitude of the stress intensity factor with a value of $50 \Delta K$ for propagate the crack in a stable manner until reaching a length of 23 mm to then finish the test. The results show that the combination of adequate microstructure and residual stress in the HAZ are those factors which can stop the advance of the crack in the weld material.

KEYWORDS: Crack, fatigue, stress, welding, sheet.

INTRODUCCIÓN

En una estructura de un autobús se han encontrado fallas por fatiga debido a las sollicitaciones a que se ve sometida durante la operación cotidiana del autobús. Se detectó y ubicó el punto de inicio de la falla Figura 1. En este caso, las grietas se observan en los puntos donde el marco está soldado en forma de T, con los perfiles PTR horizontales. Las probetas ensayadas en esta investigación fueron obtenidas del elemento de acero estructural del cual están ensamblados los autobuses, que es un acero de bajo carbono.

Investigaciones previas, que han realizado pruebas de propagación de grietas en lámina soldada para determinar el cambio

en la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, ΔK , en diferentes secciones de la zona alrededor de la soldadura [1], han concluido que la resistencia al crecimiento de la grieta disminuye cuando la relación de carga disminuye en la región de la soldadura, excepto en la zona afectada por el calor. Esto puede ser debido a la no uniformidad en la estructura cristalina causada por el sobrecalentamiento durante la aplicación de la soldadura.

Por otro lado, se ha reportado que un factor importante es el efecto que tiene el espesor del material a ensayar sobre la propagación de grietas por fatiga.

En otra investigación [2] se obtuvieron datos que sustentan la hipótesis de que la propagación de grietas es función del espesor del material y que está crece conforme el espesor del material crece.

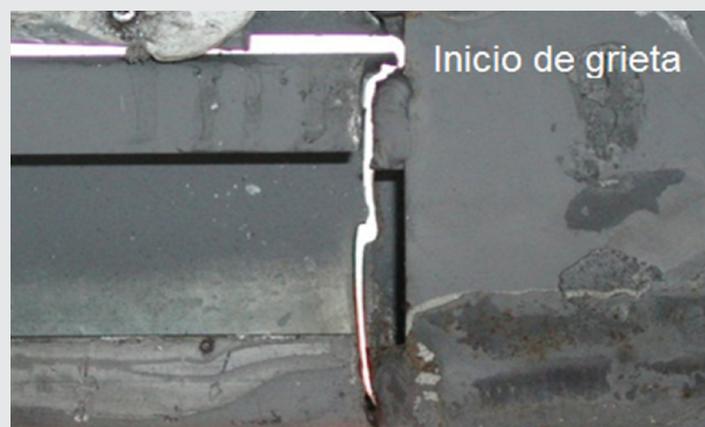


Figura 1. Localización de la grieta en miembro estructural de un autobús.

El objetivo de este estudio es determinar el efecto de la soldadura en la propagación de grietas por fatiga en una lámina de acero de bajo carbono para saber si una grieta que inicia en la zona aledaña de la soldadura se propagara de una manera estable o no.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material utilizado fue obtenido del perfil tubular. Se secciono para obtener las muestras para el análisis químico y para maquinar las probetas para las pruebas de tensión y de crecimiento de grieta.

La Tabla 1 muestra la composición química del acero estructural analizado.

Tabla 1. Composición química del acero estructural original analizado (Acero AISI 1020).

%C	%S	%Mn	%P	%Si
0.1838	0.0082	0.4533	0.0089	0.0183

Metalografía

Para conocer la microestructura se tomó una muestra del material soldado, el cual se preparó con los procedimientos metalográficos para obtener una superficie pulida a espejo, después se atacó con Nital al 2% para revelar la microestructura.

Fabricación de las probetas para pruebas de tensión

Mediante el proceso de electroerosión por hilo, se fabricaron 16 probetas de PTR calibre 14, de acuerdo a la Norma ASTM E08 - 00 [3].

El promedio de las propiedades mecánicas del material, obtenidas en las pruebas de tensión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del material.

PTR calibre (mm)	E(GPa)	Sy(MPa)	Su(MPa)
2.0	217	372	427

Geometría de probetas para mecánica de fractura. Las probetas empleadas son tipo CT (Compact Tension), cuya geometría se muestra en la Figura 2, y sus dimensiones son: ancho $W = 50$ mm y espesor $B = 2$ mm.

Todas las probetas fueron obtenidas de una misma chapa y fabricadas según las recomendaciones de la Norma ASTM E647-05 [4], con el proceso de electroerosión por hilo.

La Figura 2 muestra una probeta del material ensayado sin cordón de soldadura.

El maquinado de las probetas soldadas consistió en realizar el inicio de la entalla en el borde del cordón de soldadura, con el objetivo de generar la grieta en esta parte, las Figuras 3 y 4 muestran las probetas con cordón de soldadura.

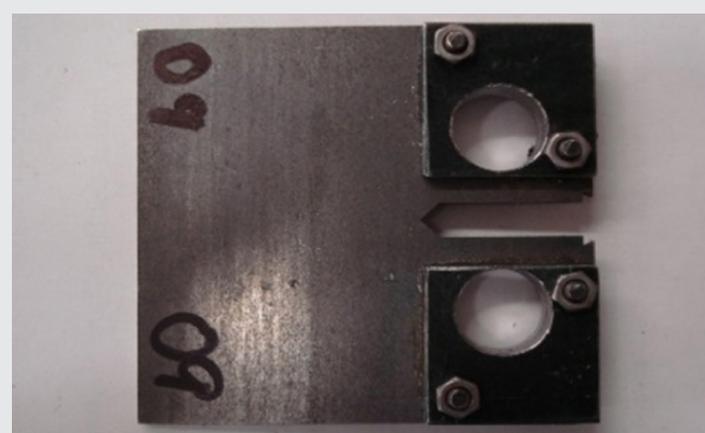


Figura 2. Probeta para pruebas de fatiga sin cordón de soldadura.



Figura 3. Entalla en el borde del cordón de soldadura de la probeta para fatiga.

Siete pruebas en probetas de 2 mm de espesor con 5 mm de ancho de entalla.
Cinco pruebas en probetas de 2 mm de espesor, incrementando 10 % la carga cada 20,000 ciclos.

Medición de esfuerzos residuales

Con el método de Hole-Drilling se identificaron y cuantificaron los esfuerzos residuales en un plano, cerca de la superficie de medición en el material analizado.

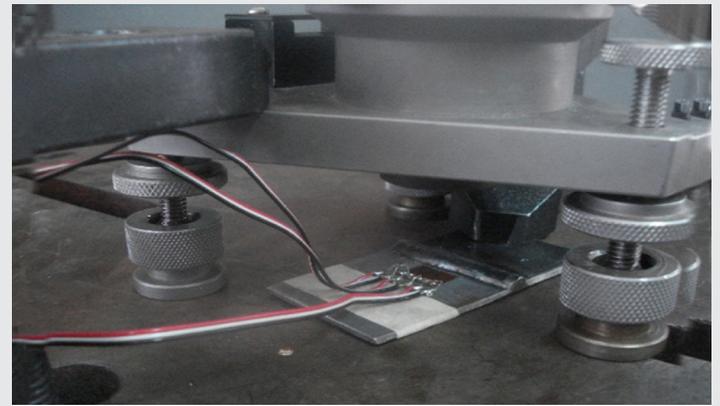


Figura 5. Aparato para realizar la prueba mediante el método Hole-Drilling y probeta instrumentada.



Figura 4. Probeta para pruebas de fatiga con cordón de soldadura.

Se aplicó el método Hole-Drilling para determinar los esfuerzos residuales cerca de la superficie del cordón de soldadura, para esto se fijaron galgas extensométricas Figura 5 en la superficie de la lámina, se perforó un agujero en el centro de estas, y se obtuvieron las mediciones de los esfuerzos resultantes aliviados.

Condiciones para las pruebas de fatiga.

Para las pruebas se consideraron las siguientes condiciones:

Amplitud de carga = 1.757 kN

Relación de cargas = 0.1

Carga máxima = 1.955 kN

Carga mínima = 0.1955 kN

Precarga = 1.075 kN.

Pruebas de fatiga

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma ASTM E 647-05 [4] a carga constante y a una frecuencia de 10 Hz en una máquina servohidráulica Instron 8801.

La longitud de grieta se midió considerando la función complianza dada en dicha Norma. El desplazamiento de abertura se midió con un extensómetro colocado en la cara frontal de la probeta.

Se realizaron 12 pruebas de velocidad de crecimiento de grieta:

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos de esfuerzos en el material cerca del cordón de soldadura.

Tabla 3. Valores de esfuerzos medidos

Profundidad (mm)	Esf. max.(Pa)
0.1016	-128707161
0.2032	-66207160
0.3048	-72275016
0.4064	-77779110
0.508	-72790927
0.6096	-75788975

Simulación

Se encontró un modelo que permite una simulación compleja pero flexible de una evolución de crecimiento de grieta junto con los esfuerzos, este modelo se obtuvo a partir de un problema real.

Se obtuvieron varias imágenes que simulan el crecimiento de la grieta, que corresponde a un paso de tiempo de una décima parte del tiempo requerido para que la grieta alcance 23 mm de longitud. La primera y la última se muestran para el caso analizado, Figuras 6 y 7.

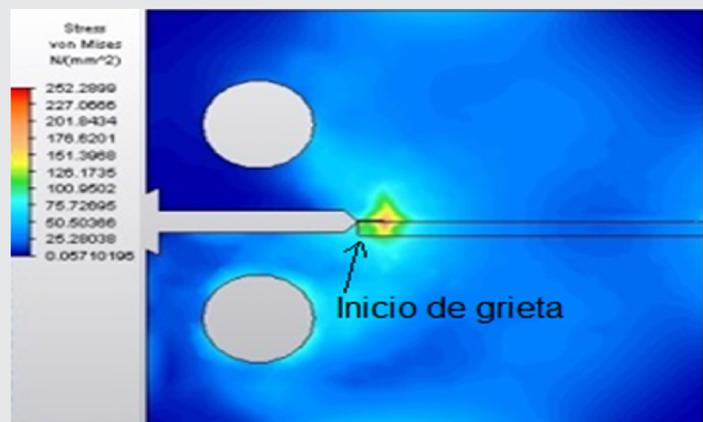


Figura 6. Inicio de grieta.

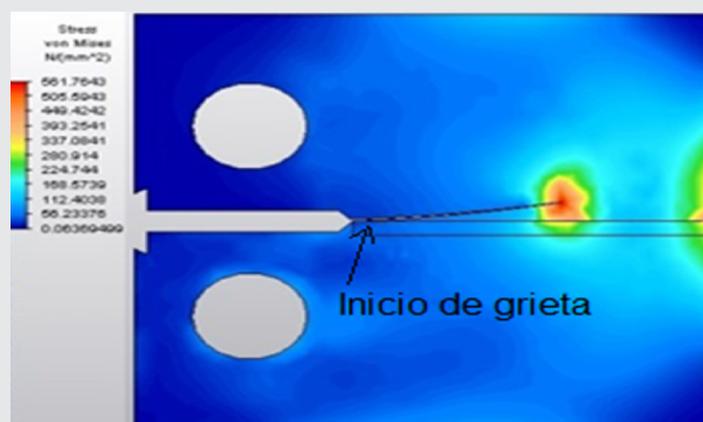


Figura 7. Grieta completa.

RESULTADOS

En la Figura 8 se muestra la microestructura del metal base, que consiste de una estructura característica de perlita más ferrita. Asimismo, se muestra la microestructura de la soldadura característica de un material solidificado y la zona afectada por el calor, donde existe la presencia de granos grandes, zona de transición y metal base.

La gráfica de una de las probetas PGF, Figura 9, elaborada con los datos que se obtuvieron de las pruebas en probetas del material sin cordón de soldadura, muestran que la región de crecimiento estable de la grieta está aproximadamente en $25 \Delta K MPa\sqrt{m}$ y termina aproximadamente en $50 \Delta K MPa\sqrt{m}$

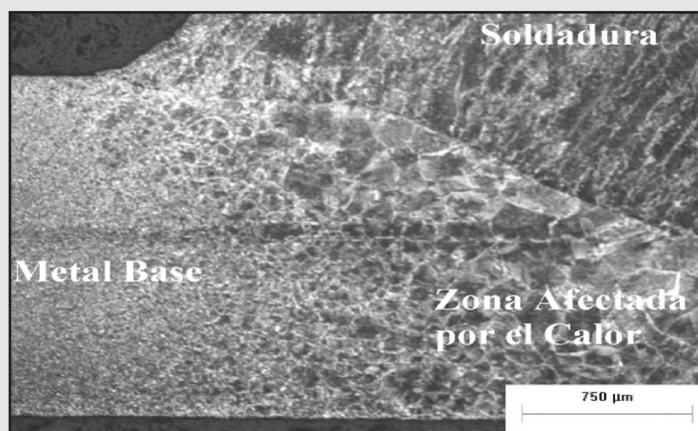


Figura 8. Microestructura del material soldado donde se muestra la soldadura, zona afectada por el calor y el material base.

La línea de tendencia de los datos graficados muestra una pendiente mayor a la de los datos obtenidos de las pruebas de las probetas con cordón de soldadura.

La gráfica de una de las probetas CGS, Figura 10, obtenida con los datos de la probetas con cordón de soldadura muestran que en un inicio la velocidad de propagación de grietas por fatiga disminuye, por lo que se considera que existe una zona de arresto (detención) de grieta, la velocidad se incrementa hasta que alcanza un valor de $50 \Delta K MPa\sqrt{m}$ y termina en $70 \Delta K MPa\sqrt{m}$ este intervalo representa la zona de crecimiento de grieta estable. Por otro lado, las líneas de tendencia muestran una pendiente menor que la de la línea de tendencia de los datos de las pruebas del material sin cordón de soldadura.

Es probable que este comportamiento inicial de disminución de la velocidad de propagación de grieta por fatiga se deba a una combinación de la estructura de la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales. Cuando el tamaño de grano del acero es grande la velocidad de propagación es menor que los de tamaño de grano fino, debido al efecto del fenómeno de cerradura de grieta inducida por la rugosidad de la superficie de fractura [5]. Otro factor importante son los esfuerzos residuales debido al proceso de soldadura. Son esfuerzos residuales de compresión por lo que se contrarresta con los esfuerzos de tensión produciéndose un K efectivo menor que el que se le aplica en la punta de la grieta [6].

En las Tablas 4 y 5 se muestran los valores obtenidos de las constantes de Paris. Estas tablas muestran que el valor de m es más alto en el acero sin soldar que el acero soldado, entre menor sea el valor m, mayor dificultad de avanzar la grieta por fatiga debido probablemente a un efecto combinado de

microestructura con esfuerzos residuales.

CONCLUSIONES

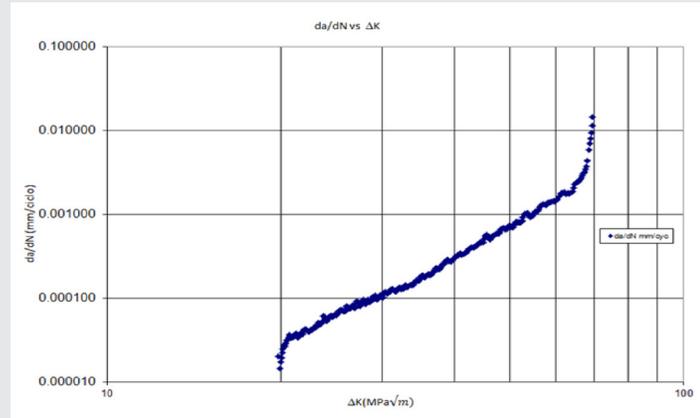


Figura 9. Gráfica de $da/dN - \Delta K$ del material base. Sin cordón de soldadura.

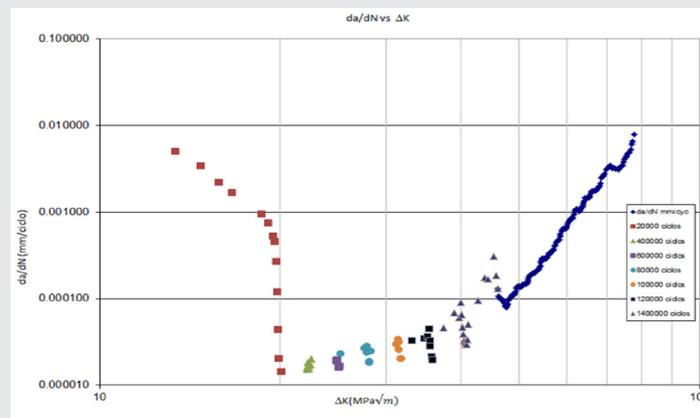


Figura 10. Gráfica de $da/dN - \Delta K$ del material con cordón de soldadura.

Tabla 4. P Constantes de Paris para el material base.

Probeta	C	m
PGF-01	1×10^{-9}	3.5346
PGF-02	3×10^{-8}	2.656
PGF-03	4×10^{-9}	3.3301
PGF-04	5×10^{-9}	3.1456
PGF-05	2×10^{-9}	3.4273
PGF-06	8×10^{-9}	3.0349
PGF-07	7×10^{-9}	3.0874

Tabla 5. Constantes de Paris para el material soldado.

Probeta	C	m
CGS-01	1×10^{-6}	0.1174
CGS-02	2×10^{-6}	0.1058
CGS-03	5×10^{-8}	0.1581
CGS-04	3×10^{-7}	0.1349
CGS-05	2×10^{-7}	0.1490

Las pruebas de propagación de grietas por fatiga realizadas en el acero del perfil rectangular tubular, muestran diferencias significativas en las constantes de Paris, lo que implica que es más difícil propagar una grieta por fatiga en el material soldado que en el material sin soldar.

Es posible afirmar que la mayor resistencia a la fatiga en el material soldado se da por la combinación de la microestructura en la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales medidos.

BIBLIOGRAFÍA

[1]. K. Krishnaprasad, and Raghu V. Prakash. *Fatigue crack growth behavior in dissimilar metal weldment of stainless steel and carbon steel*. World Academy of Science, Engineering and Technology (56). Pages 873 - 879. 2009.

[2]. Heung-Bae Park, and Byong-Whi Lee. *Effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate*. Nuclear Engineering and Design (197). Pages 197-203. 2000.

[3]. American Society for Testing and Materials, E 8M - 00 Standard Test Method for Testing of Metallic Materials [Metric], American Society for Testing and Materials, USA. 2000.

[4]. American Society for Testing and Materials, E 647 - 05 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, American Society for Testing and Materials, USA. 2005.

[5]. González, Jorge L., *Mecánica de fractura, bases y aplicaciones*, Segunda edición. Limusa Noriega, México D. F. 2004.

[6]. Shi Y. W., Chen B. Y., Zhan J. X. *Effects of welding residual stress on fatigue crack growth behaviour in butt welds of a pipeline steel*. Engineering Fracture Mechanics. Volume 36, pages 893 - 902. 1990.

[7]. Chapetti M. D., Belmonte J., T. Tagawa, T. Miyata. *Integrated fracture mechanics approach to analyse fatigue behaviour of welded joints*. Science and Technology of Welding and Joining. Volume 9, Issue No. 5, pages 430 - 438. 2004.

[8]. Li Y., Wierzbicki T, Sutton M., Yan J., Deng X. *Mixed mode stable tearing of thin sheet Al 6061-T6 specimens: experimental measurements and finite element simulations*. International Journal of Fracture. December 2009.

[9]. Shahani A.R., Rastegar M., Botshekanan M., Moayeri H. *Experimental and numerical investigation of thickness effect on ductile fracture tough-*

ness of steel alloy sheets. *Engineering Fracture Mechanics*. Volume 77, pages 646 – 659. 2009.

[10]. Oluseun J. *On the fracture and fatigue crack growth of thin sheets of nanocrystalline metal alloys*. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2010.

[11]. Al-Haidary J. T., Wahab A. A., Abdul Salam. E. H. *Fatigue crack propagation in austenitic stainless steel weldments*. *Metallurgical and Materials Transactions*. Volume 37a, pages 3205 - 3214. 2006.

[12]. Pouget G., Reynolds A.P. *Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds*. *International Journal of Fatigue*. Volume 30, pages 463 – 472. 2008.

Ingeniantes



Ingeniantes

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla