

ISSN 2594-2921

# Científica

**Científica:** Journal of Electromechanical Engineering | vol. 26, no. 1 | January-June 2022 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



## Volumen 26 Issue 1, January-June 2022

### Nuevo arreglo experimental de la técnica columna de longitud cero para la separación de olefinas y parafinas en tamices moleculares

New configuration of the zero-length column technique to determine the diffusion coefficients and isotherms of pure components and mixtures in molecular sieves

Jaquibet **Vargas-Bustamante**; Pedro **Martínez-Ortiz**; José **Balmaseda-Era**.

---

### Implementación del modelo tríada de riesgos, para determinar la probabilidad de falla en ductos: caso corrosión externa

Implementation of the risk triad algorithm to determine the probability of failure in pipelines: case of external corrosion

Juan David **Betancur-Ríos**; Nora Yamile **Rojas-Cataño**.

---

### Aplicación web para práctica con vectores y soporte educativo bajo el modelo de Educación Basada en Web

Web application for practice with vectors and educational support under the Web-Based Education model

Rubén **Peredo-Valderrama**; Iván **Peredo-Valderrama**.

---

### Desarrollo de sitio web para IoT con Arduino

IoT website with Arduino

Gloria Mónica **Martínez Aguilar**; Abel **Sosa Escobedo**; Vanessa Maribel **Morales Ibarra**.

---

### Diseño de un sistema automático de embotellado y sellado de botellas para jugos de 250 mm<sup>3</sup>

Design of an Automatic System for Bottling and Sealing Bottles for Juices of 250 mm<sup>3</sup>

Jessica Gisella **Maradey-Lázaro**; Arly Darío **Rincón-Quintero**; Jhon Alexander **Caballero-Moreno**; Gustavo Andrés **Castellanos-Gómez**; Camilo Leonardo **Sandoval-Rodriguez**.

## **Evaluación de la Incidencia de la geometría del área de reflexión en el rendimiento óptico de un prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico**

Evaluation of the incidence of the geometry of the reflection area in the optical performance of a handmade prototype of a parabolic trough concentrator

Brayan Eduardo **Tarazona-Romero**; Javier Gonzalo **Ascanio-Villabona**; Camilo Leonardo **Sandoval-Rodriguez**; Arly Darío **Rincón-Quintero**.

---

## **Truck Chassis Design and Analysis**

Diseño y análisis del chasis para camiones

João Batista **De Aguiar**; José Manoel **De Aguiar**.

---

## **Revisión y análisis del estado de arte de los mecanismos flexibles: métodos de diseño y sus aplicaciones**

State of the art review and analysis for compliant mechanisms: design methods and applications

Elvis **Coutiño-Moreno**; Tomas **De la Mora-Ramírez**; Daniel **Maldonado-Onofre**; Luis Antonio **Mier-Quiroga**.

---

## **Investigación científica sobre tecnologías empleadas en quemadores de biomasa tipo pellets a pequeña escala, como potencial energético alternativo: una revisión bibliométrica**

Scientific research on technologies used in small-scale pellet-type biomass burners as alternative energy potential: a literature review

Arly Darío **Rincón-Quintero**; Luis Alfonso **Del Portillo-Valdés**; Omar **Lengerke-Perez**; Wilmar Leonardo **Rondón-Romero**; Camilo Leonardo **Sandoval-Rodriguez**; Brayan Eduardo **Tarazona-Romero**.

---

## **Flujos óptimos de potencia con restricciones de estabilidad ante pequeños disturbios**

Optimal power flow with small signal stability constraints

José Antonio **Gándara-Capistrán**; Daniel **Olguín-Salinas**.

---

**CIENTIFICA**, year 26, issue 1 January-June 2022. Biannual Journal online published by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: [cientifica@ipn.mx](mailto:cientifica@ipn.mx), Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

The responsibility of the materials published in Científica rests solely with their authors and their content does not necessarily reflect the criteria of the Editorial Board or the Instituto Politécnico Nacional. The total or partial reproduction of the texts hereby published is authorized as long as the complete source and the electronic address of the publications are cited, they are distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, there is no fee for article processing, submission or publication.

## Nuevo arreglo experimental de la técnica columna de longitud cero para la separación de olefinas y parafinas en tamices moleculares

New configuration of the zero-length column technique to determine the diffusion coefficients and isotherms of pure components and mixtures in molecular sieves

Jaquibet Vargas-Bustamante<sup>1</sup>, Pedro Martínez-Ortiz<sup>2</sup>, Jorge Balmaseda-Era<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO

Posgrado en Ciencias e ingeniería de Materiales | Instituto de Investigaciones en Materiales

[jaquibet@comunidad.unam.mx](mailto:jaquibet@comunidad.unam.mx)

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

Laboratorio de Evaluación No Destructiva Electromagnética | Departamento de Ingeniería Eléctrica

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

[pmartinezo@ipn.mx](mailto:pmartinezo@ipn.mx)

<sup>3</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO

Instituto de Investigaciones en Materiales

[balmaseda@comunidad.unam.mx](mailto:balmaseda@comunidad.unam.mx)

Recibido 27-09-2021, aceptado 10-12-2021

### Resumen

Se desarrolló una nueva configuración de la técnica columna de longitud cero (ZLC), que permite utilizar las diferentes variantes de cromatografía para determinar de forma rápida los coeficientes de difusión e isothermas de componentes puros y mezclas en tamices moleculares. El innovador diseño permite realizar todos los estudios en una sola muestra facilitando el uso de los parámetros en modelos teóricos o simulaciones moleculares. Una de las características clave del nuevo sistema es que es posible llevar a cabo el proceso de adsorción y separación de olefinas y parafinas mediante el uso de 5 a 15 mg de adsorbente. Por medio de dos detectores de ionización de llama es posible determinar la composición a la salida de ambas columnas y estudiar los perfiles de desorción. A través de dos válvulas de 4 y 6 vías que se comunican con dos pares de controladores de flujo másico, se diseñó una configuración para mediciones cinéticas y al equilibrio. Mediante la ayuda del software LabVIEW y las tarjetas DAQ se gestionó todo el proceso experimental. La nueva configuración de ZLC se aplicó para estudiar la adsorción y separación de CH<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> en la zeolita 5A, con los cuales se validó la nueva configuración experimental.

**Palabras clave:** columna de longitud cero, difusión, separación de hidrocarburos.

### Abstract

A new configuration of the zero-length column (ZLC) technique was developed, which allows the use of different chromatography variants to quickly determine the diffusion coefficients and isotherms of pure components and mixtures in molecular sieves. The innovative design allows all studies to be performed on a single sample, facilitating the use of the parameters in theoretical models or molecular simulations. One of the key features of the new system is that it is possible to carry out the adsorption and separation process of olefins and paraffin using 5 to 15 mg of the adsorbent. By means of two flame ionization detectors, it is possible to determine the composition at the outlet of both columns and to study the desorption profiles. Through two 4- and 6-way valves communicating with two pairs of mass flow controllers, a configuration for kinetic and equilibrium measurements was designed. With the help of LabVIEW software and DAQ cards, the whole experimental process was managed. The new ZLC setup was applied to study the adsorption and separation of CH<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> on zeolite 5A, with which the new experimental setup was validated.

**Index terms:** zero-length column, diffusion, hydrocarbon separation.

## I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de separación de mezclas gaseosas se encuentran entre las operaciones más importantes en la industria petroquímica [1]. Para obtener componentes de alta pureza, la tecnología de separación más avanzada es la destilación criogénica [2]. Sin embargo, este proceso consume grandes cantidades de energía y requiere altos costos de inversión [3], [4]. Se han propuesto otros métodos de separación que son menos agresivos al medio ambiente, fáciles de implementar y con bajos costos de operación [5], [6]. Una de estas alternativas es la separación adsortiva, que se basa en materiales porosos, en forma de tamices moleculares o como soporte de especies con interacciones específicas con los adsorbatos [7], los cuales han mostrado un enorme potencial en la separación de olefinas y parafinas [8].

En principio, la separación adsortiva se puede conseguir basándose en diferencias tanto en las interacciones adsorbato-adsorbente, (selectividad de equilibrio) como en la razón de adsorción (selectividad cinética). En consecuencia, es necesario el estudio y selección de nuevos tamices moleculares en función de su selectividad. Existe un gran número de técnicas analíticas que permiten determinar experimentalmente las características de los tamices, las más sobresalientes son los volumétricos y gravimétricos [9]. En general, dichas técnicas son precisas, pero siguen siendo costosas ya que requieren de un mayor tiempo de prueba y, en consecuencia, de una mayor cantidad de muestra para su estudio [10].

Una de las técnicas que posee la mejor relación costo/precisión y que permite realizar un mayor número de experimentos por unidad de tiempo es la cromatografía en columna de longitud cero (ZLC) [11], [12]. En esta investigación se propuso el desarrollo de una nueva instalación semiautomatizada que permite estudiar el equilibrio y la cinética de adsorción de mezclas de interés mediante tamices moleculares. Una de las características de esta nueva instalación es que es posible estudiar los procesos de difusión y las isothermas de adsorción de componentes puros y mezclas en una sola medición y sin necesidad de utilizar equipos muy sofisticados. Por otro lado, el uso de pequeñas cantidades de adsorbente (2 a 15 mg) facilita el desarrollo y prueba de nuevos adsorbentes a menor costo, lo que es una pieza clave de la nueva instalación experimental (ieZLC).

En este trabajo se presenta la implementación de la ieZLC (hardware y software) y se estudiará el proceso de separación de metano y etano, que son los componentes principales del gas natural [13]. El gas natural es un combustible fósil y su composición es muy variable, ya que su composición depende de la fuente de yacimiento. Generalmente está compuesto de metano  $\text{CH}_4$  (30-90%) y otros hidrocarburos ligeros, como etano y propano, así como de otros hidrocarburos más pesados [14]. La importancia de la separación de etano contenido en el gas natural se debe a que el etano es una materia prima importante para la industria petroquímica, a partir de ella se obtiene productos como el etileno y otros derivados [15]. Por otra parte, la extracción de etano es importante para controlar el punto de rocío y el índice de Woobe del gas natural, propiedades que son importantes para su transporte en gasoductos [16].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS PARA OPERAR LA IEZLC

### A. Hardware de la ieZLC

Las isothermas de adsorción y los coeficientes de difusión en este trabajo se llevaron a cabo mediante el sistema semiautomático que se muestra en la Fig. 1. El componente principal de la nueva instalación ieZLC es la columna de longitud cero (véase Fig.3), la cual se alimenta con la composición de un gas puro (adsorbato), o con la mezcla de diferentes gases y con un gas portador (helio). Esta alimentación se lleva a cabo a través de una válvula selectora de 4 vías (FSV-4) de flujo estándar, que funciona mediante dos posiciones y es operable hasta 250°C [17]. El control de los flujos que se entregan a la válvula se realiza por medio de controladores de flujo másico (MFC), modelo Z-500 de la compañía Horiba [18].

Para garantizar condiciones isotérmicas durante el proceso experimental, la ZLC y la válvula FSV-4 son ubicadas dentro del horno del cromatógrafo de gases (modelo GC-8A, Shimadzu), el cual es operable a una temperatura

máxima de 400°C. La obtención de las curvas de desorción para gases puros y, en consecuencia, el coeficiente de difusión y las isothermas de adsorción, se obtienen por medio de un detector de ionización de llama (FID-1), el cual monitorea una corriente de salida del orden de  $10^{-12}$  A. Esta corriente es originada por los iones producidos por la pirolización de los gases a la salida de la ZLC. Para llevar a cabo la adsorción se debe primero desgasificar el adsorbente, posteriormente este se equilibra con el gas de prueba. Una vez que se alcanza el equilibrio, en el momento cero de la desorción el flujo de entrada se cambia a gas de purga. Para obtener la curva virgen de desorción es necesario monitorear la composición a la salida del detector FID-1 hasta cierto tiempo definido en la ieZLC.

3

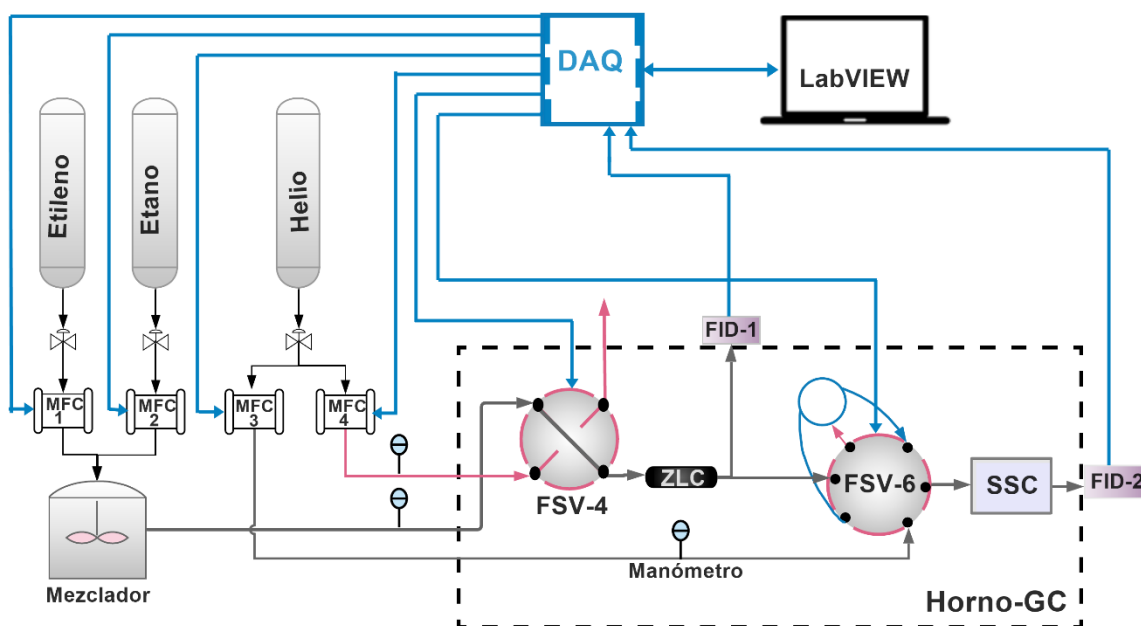


Fig. 1. Diagrama esquemático de la ieZLC para determinar: coeficientes de difusión e isothermas de adsorción de gases puros y mezclas.

En el diseño tradicional de ZLC un espectrómetro de masas es conectado a la salida de un detector (FID-1), de esta forma se determinan las composiciones de los gases y se obtienen las isothermas de mezclas. En este nuevo diseño, para conocer la composición del efluente, se reemplazó el espectrómetro de masas por una columna de separación semicapilar (SSC) ubicada dentro del Horno-GC y conectada a un segundo detector (FID-2). Para ello, se utilizó una válvula de 6 vías con dos posiciones (FSV-6). En la posición A de la FSV-6, parte del efluente de la ZLC carga un bucle y luego en la posición B se descarga el bucle en la columna de separación SSC. Una vez que la corriente de gas efluente pasa por la columna de separación, se suministra una corriente de gas portador inerte, el cual se introduce mediante un lazo cerrado de tubería (véase Fig. 1).

El horno cuenta con una etapa de acondicionamiento de señal que consiste en un amplificador de alta impedancia con ganancia seleccionable ( $G = 1, 10^1, 10^2, 10^3$  y  $10^4$ ) y desplazamiento de nivel. Sin embargo, esta etapa dedica a un solo detector. Así que, para obtener la señal de ambos detectores al mismo tiempo, se incorporó una segunda etapa de acondicionamiento y de esta forma fue posible determinar tanto los coeficientes de difusión como las isothermas para componentes puros y mezclas.

Para optimizar todo el proceso experimental, se propuso el uso de dispositivos electromecánicos (MFC y las FSV), que se pueden configurar/monitorear vía remota a través de señales de voltaje analógicas y digitales, respectivamente. En consecuencia, se ha propuesto utilizar una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) USB-6212 de la empresa National Instruments, que cuenta con entradas/salidas analógicas y digitales para la manipulación y monitoreo del conjunto de dispositivos y detectores electromecánicos. La manipulación de la tarjeta DAQ se



lleva a cabo por medio de una interfaz gráfica de usuario desarrollada en LabVIEW, simultáneamente se gestiona el proceso experimental y el análisis/cálculo de los parámetros a partir del modelo matemático que se ha incorporado en la misma aplicación.

### B. Modelo matemático para el análisis de experimentos en la ieZLC

El modelo matemático utilizado para describir el sistema ZLC se basa en la segunda ley de difusión de Fick, que describe el balance de masa en partículas esféricas [19]. Además, también se considera el balance de masa del componente adsorbente en la fase fluida. Estos dos balances de masa deben resolverse simultáneamente para derivar la curva de desorción. En este modelo, se asume que el sistema está en condiciones isotérmicas, las partículas son esféricas y la columna ZLC es una celda bien mezclada [11].

Ecuación de solución analítica para el sistema ZLC:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L}{\beta_n^2 + L(L-1)} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{D_c}{R^2} t\right) \quad (1)$$

donde  $\beta_n$  son dados por las raíces de

$$\beta_n \cot(\beta_n) + L - 1 - \gamma \beta_n^2 = 0 \quad (2)$$

$$L = \frac{FR^2}{3KV_s D_c} \quad (3)$$

En estas ecuaciones,  $C$  es la concentración en cualquier tiempo  $t$ ,  $C_0$  es la concentración inicial,  $F$  es el caudal de purga,  $V_s$  es el volumen sólido,  $K$  es la constante adimensional de la ley de Henry,  $D_c$  el coeficiente de difusión y  $R$  es el radio de las partículas ( $L$  y  $\beta$  son los parámetros adimensionales).  $L$  representa la relación entre el tiempo de difusión y el tiempo de desorción convectiva [20]. Este parámetro nos permite entender si el sistema está controlado por equilibrio (valores pequeños de  $L$ ,  $L < 1$ ), o cinéticamente (valores grandes de  $L$ ,  $L > 10$ ) [21].

Para sistemas no lineales o componentes fuertemente adsorbidos, en condiciones de equilibrio, cada punto de la curva de desorción es un punto de equilibrio en la isoterma [20], [21]. La expresión resultante para la cantidad adsorbida total viene dada por:

$$q = C_T \int_0^{\infty} \frac{y}{1-y} d\left(\frac{Ft}{V_s}\right) - C_T \int_0^t \frac{y}{1-y} d\left(\frac{Ft}{V_s}\right) - \frac{V_m C_T}{V_s} \cdot y \quad (4)$$

dónde  $F$  es el caudal del gas portador,  $y$  es la fracción molar de sorbato en la fase gaseosa, y  $C_T$  es la concentración total en la fase gaseosa.

### C. Software de la ieZLC

La interfaz gráfica de usuario desarrollada en el ambiente de programación gráfica de LabVIEW en conjunto con la tarjeta DAQ, ambos de National Instruments, fue diseñada para gestionar todo el proceso experimental de la ieZLC, desde la configuración de los parámetros de medición hasta el cómputo de las curvas y parámetros de difusión e isothermas de adsorción. En la Fig. 2 se muestra la interfaz gráfica de usuario desarrollada para la ieZLC.



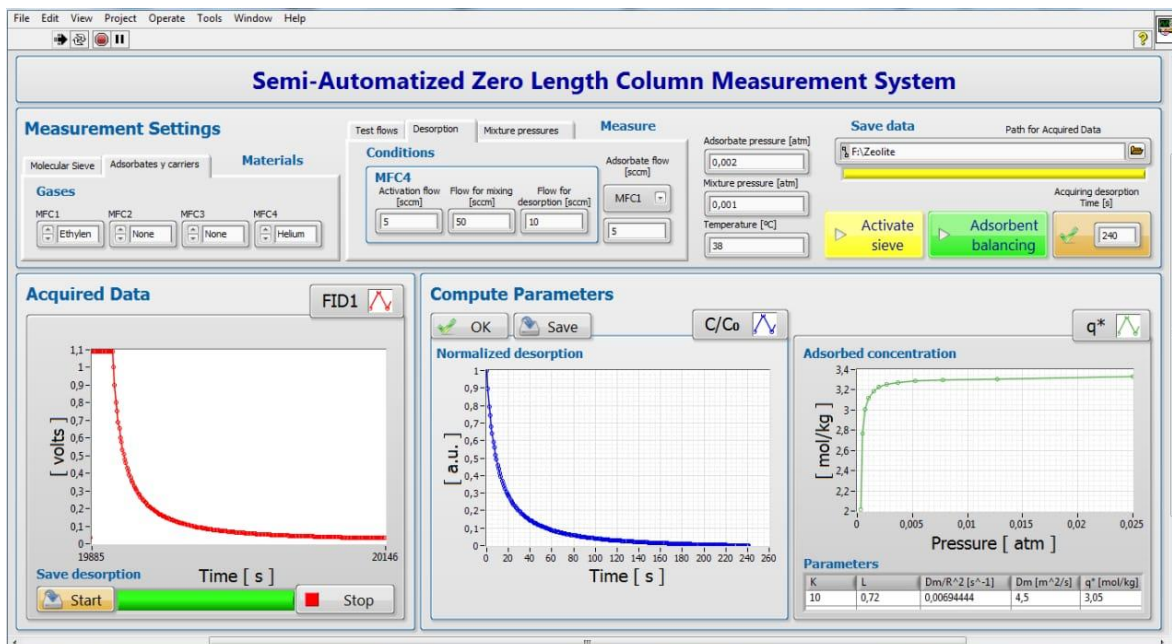


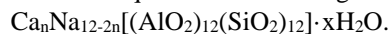
Fig. 2. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para la ieZLC.

Las secciones que conforman el panel frontal de la interfaz gráfica de usuario y las funciones que desempeña internamente el software son:

- 1) Selección de materiales: se define el tamiz molecular, los gases de estudio y el gas portador (He).
- 2) a) Selección de la rutina de adsorción: para gases puros o mezclas, b) Configuración de la rutina de los flujos másicos: activación, equilibrio y proceso de desorción c) Configuración de las presiones: se controla la presión de los gases puros, mezclas y del gas portador, y d) Configuración de la temperatura del Horno-GC.
- 3) Especificación de ruta de almacenamiento de parámetros de medición y de las mediciones de los detectores FID.
- 4) Selección de la rutina de trabajo: a) Proceso de activación del tamiz molecular, b) Proceso de equilibrio del adsorbente y c) Proceso de desorción de forma continua o por un determinado tiempo.
- 5) Adquisición y almacenamiento de la señal del detector FID: adquisición en tiempo real de los datos de las curvas vírgenes y almacenamiento de datos.
- 6) Cómputo y almacenamiento: cálculo y almacenamiento de los parámetros de adsorción (curvas de desorción, coeficientes de difusión e isothermas).

#### D. Procedimiento experimental

Para los experimentos de adsorción y difusión en la ieZLC se empleó como tamiz molecular una muestra de zeolita 5A que se obtuvo de Sigma-Aldrich (número CAS 69912-79-4), con fórmula molecular:



La columna ZLC consta de una unión Swagelok de 1/8 de pulgada (véase Fig. 3). En el que se empaqueta una pequeña cantidad de tamiz molecular, de entre 2 a 15 mg, entre dos discos sinterizados de malla de 100  $\mu\text{m}$ .

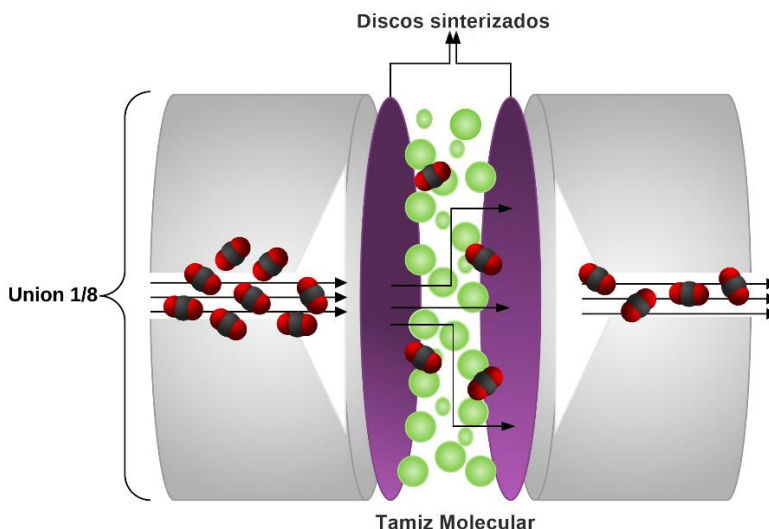


Fig. 3. Diagrama esquemático de la ZLC.

Para validar el correcto funcionamiento del sistema ieZLC propuesto, se determinaron las isotermas de adsorción y los coeficientes de difusión de metano (Infra, pureza ultra alta) y etano (Infra, pureza 99: 99%) en zeolita 5A a 298K y 308K, los resultados obtenidos se compararon con los reportados en la literatura. Es importante destacar que esta instalación experimental permite realizar todos los experimentos necesarios sin cambiar de tamiz molecular (zeolita 5A), lo que reduce considerablemente el tiempo de medición ya que se evitan los procesos de desgasificación.

Una vez que se coloca la columna ZLC dentro del Horno-GC, se lleva a cabo la activación del tamiz molecular, desde temperatura ambiente hasta la temperatura de desgasificación, con una velocidad de rampa de  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , y se activa el tamiz molecular durante 12 h, a un flujo de  $5\text{ cm}^3/\text{min}$  de Helio 6.0 (Praxair, Ultra alta Pureza). Es importante aclarar que este proceso debe realizarse en cada una de las mediciones y cuando se cambian las condiciones experimentales.

Después de la activación, la temperatura del horno se reduce a la temperatura de prueba. Durante el experimento, una pequeña muestra del adsorbente se equilibra con una alimentación conocida de metano o etano según sea el caso (Infra, pureza 99.99%), diluida en una corriente de gas portador inerte (10%  $\text{CH}_4$  y  $\text{C}_2\text{H}_6$  en helio) durante 1 h. En el momento cero, el flujo de entrada se cambia a corriente de helio puro (velocidad de flujo de  $10\text{ cm}^3/\text{min}$ ) y la concentración del efluente se monitorea con el detector FID-1. Se utilizó hidrógeno (Infra, pureza 99,99%) y aire (Infra, aire extra seco) para encender el detector.

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos adquiridos con la tarjeta DAQ provenientes del detector FID-1 se obtuvieron las curvas de desorción del metano y etano a 298 K y 308 K, las cuales se muestran en la Fig. 4 y la Fig. 5, respectivamente. De acuerdo con las curvas de desorción, se observa que el metano y etano tienden a difundirse más rápido por los poros de la zeolita a medida que la temperatura aumenta. En la Fig. 4 se observa que la desorción del metano es un proceso más cinético que la desorción del etano (Fig. 5). Esto puede atribuirse al hecho que el metano es una molécula esférica y su diámetro cinético ( $3.8\text{Å}$ ) es más pequeño que el etano ( $4.4\text{Å}$ ) [22]. Los parámetros obtenidos a partir de las curvas de desorción y el software de la ieZLC se resumen en la Tabla 1. Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con los valores reportados de difusividad para parafinas y moléculas pequeñas de gas ( $10^{10}\text{ m}^2/\text{s}$  a  $10^{-14}\text{ m}^2/\text{s}$ ) en la zeolita 5A [23], [24]. Estos resultados validan el correcto funcionamiento de la nueva instalación de la ieZLC. Las magnitudes de difusividad de etano indican

7

un proceso de transferencia de masa más lenta que la de metano, esto podría deberse a la menor apertura de los poros de la zeolita o a que la velocidad de difusión se vuelve aparentemente más lenta con el aumento del número de carbonos y el aumento del diámetro cinético, lo que provoca que las moléculas tengan menos grados de libertad en sus rotaciones [24].

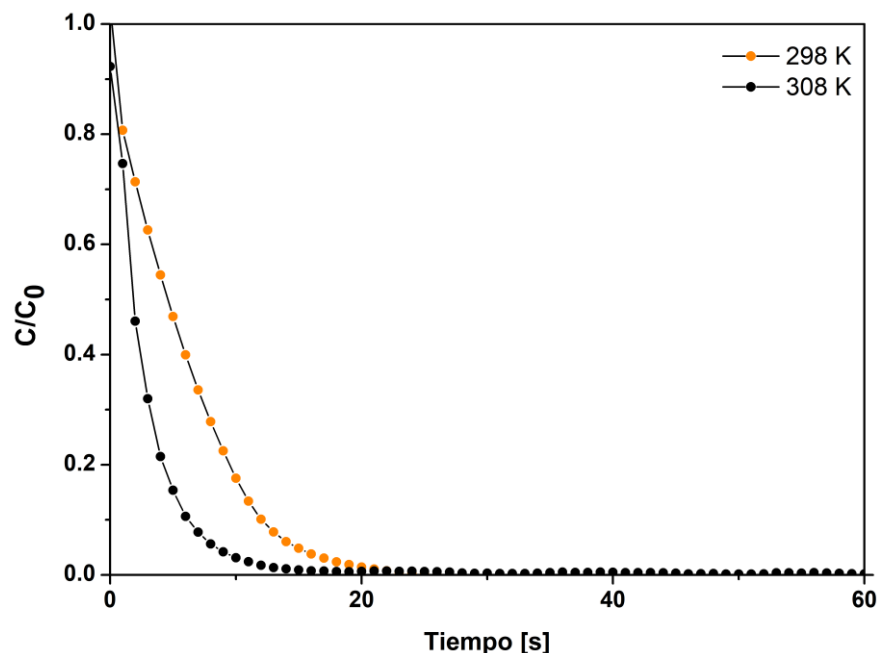


Fig. 4. Comparación de la curva de respuesta de la desorción de metano a 298 y 308 K y a 10 cm<sup>3</sup>/min.

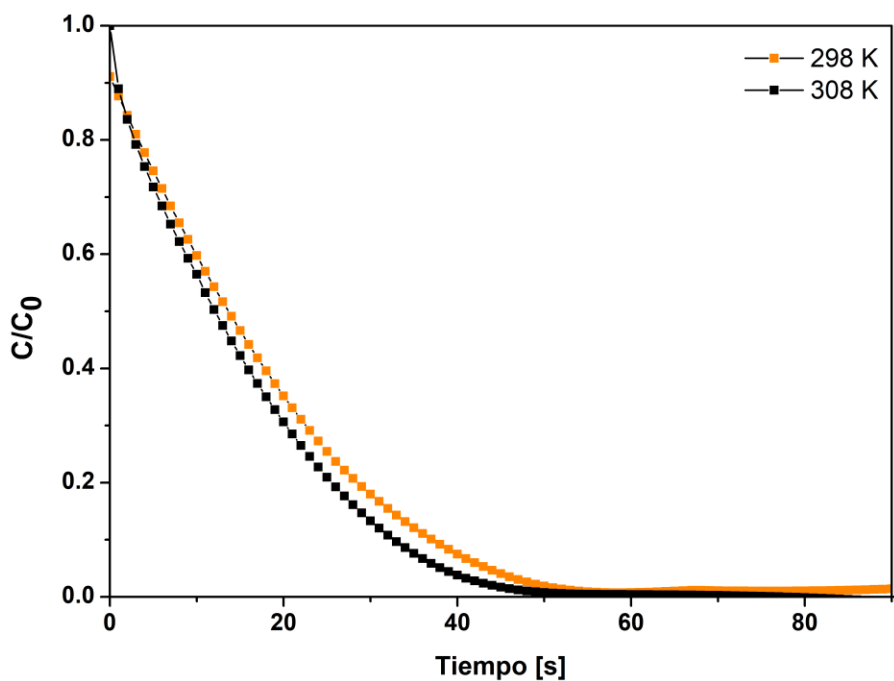


Fig. 5. Comparación de la curva de respuesta de la desorción de etano a 298 y 308 K y a 10 cm<sup>3</sup>/min.

TABLA I

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DIFUSIÓN E ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE METANO Y ETANO EN ZEOLITA 5A OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO CON ALGUNAS REPORTADAS PREVIAMENTE.

Gas	T (K)	K	L	$D_m/R^2$ (s <sup>-1</sup> )	$D_m$ (m <sup>2</sup> /s) Exp.	$D_m$ (m <sup>2</sup> /s) Ref.	q (mol/kg) Exp.	q (mol/kg) Ref.
CH <sub>4</sub>	298	801	4.1	0.010	5.9×10 <sup>-10</sup>	[25]	0.63	[25]
	308	557	5.8	0.011	6.1×10 <sup>-10</sup>	Este trabajo	0.59	[25]
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	298	486	6.6	0.024	1.23×10 <sup>-11</sup>	[25]	1.58	Este trabajo
	308	382	7.1	0.036	1.84×10 <sup>-11</sup>	Este trabajo	1.47	[27]

Las isothermas de adsorción de CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> en zeolita 5A (véase Fig. 6 y Fig.7) se obtuvieron a partir de las curvas de desorción y la ecuación 4 del modelo matemático de ZLC, el cual está incorporado en el software de la ieZLC. Para ambos gases las isothermas mostraron un comportamiento tipo Langmuir. Se observó que la capacidad de adsorción disminuye a medida que la temperatura aumenta. Tanto a 298 K como a 308 K, la carga de equilibrio de etano es más alta que la de metano, esto podría deberse a una mayor polarización de las moléculas de etano y a las interacciones más fuertes con la naturaleza polar de la zeolita 5A. La cantidad adsorbida (*q*) de metano y etano obtenidos en este trabajo mediante la técnica de ZLC coincide con los resultados reportados en la literatura [25], [25], [27]. Sin embargo, las pequeñas discrepancias pueden deberse a los diferentes métodos de síntesis para obtener la zeolita 5A, estos cambios pueden ocasionar diferentes distribuciones de tamaño de partículas y composición de defectos de red. A su vez, pequeños cambios en la relación de los cationes (Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>) dentro del mismo tipo de tamiz molecular podrían producir un rendimiento de adsorción diferente al informado [28], [28]. En este trabajo se hizo un ajuste a las isothermas de adsorción con el modelo Langmuir-Freundlich. La tabla II compila las constantes de adsorción de los modelos de isothermas experimentales y del modelo teórico. Los parámetros de isoterma se estimaron utilizando el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales implementado en el programa OriginPro Versión 8.6 32 Bit. Está claro que este modelo de isoterma de Langmuir-Freundlich se ajustó bastante bien a los datos de equilibrio tanto para etano como para etileno (*R*<sup>2</sup> alto).

TABLA II

PARÁMETROS DE ADSORCION DE LANGMUIR DE METANO Y ETANO: LA CAPACIDAD LIMITE DE LOS MICROPOROS (*n<sub>m</sub>*), LA CONSTANTE DE LANGMUIR (*K<sub>L</sub>*). ADEMAS SE REPORTA EL COEFICIENTE DE DETERMINACION (*R*<sup>2</sup>), EL ESTADÍSTICO DE FISHER (*F*).

Gas	T (K)	q (mol/kg)	<i>K<sub>L</sub></i> (bar)	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i>	df
CH <sub>4</sub>	298	0.6398	2.3282	0.9994	297145	105
	308	0.5929	1.8342	0.9998	297145	105
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	298	1.5860	18.6816	0.9982	48730	105
	308	1.4738	18.7841	0.9980	56435	106

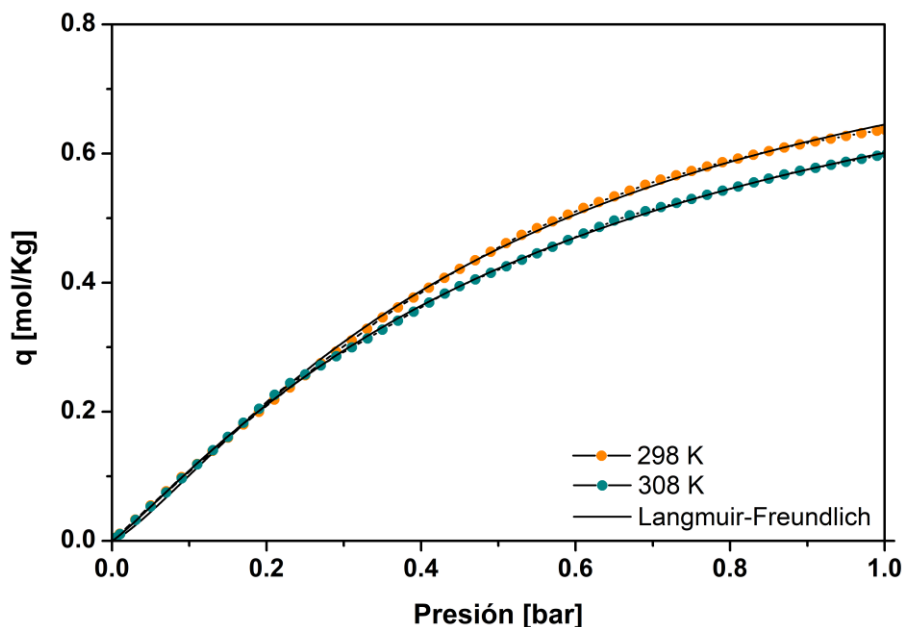


Fig. 6. Comparación de las isothermas de adsorción de metano en zeolita 5A a 298 y 308 K.

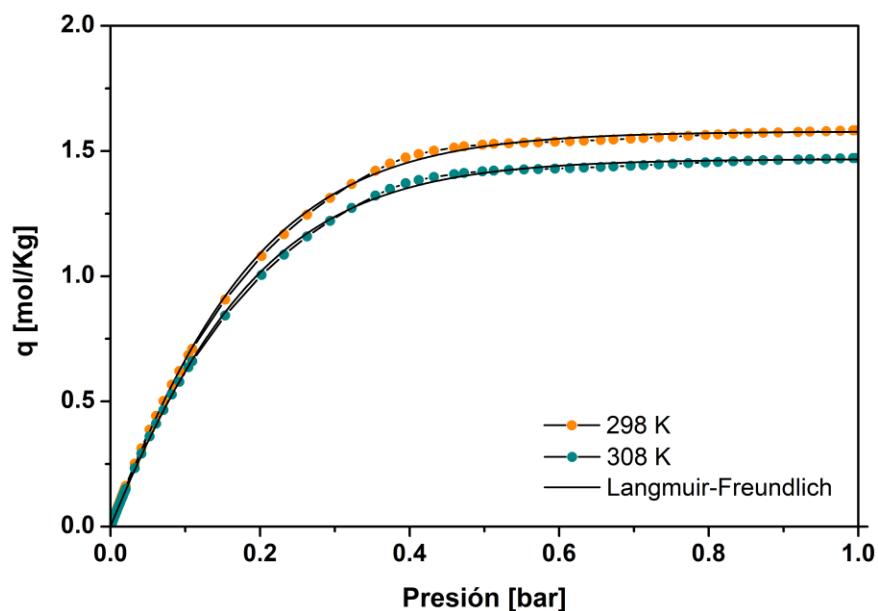


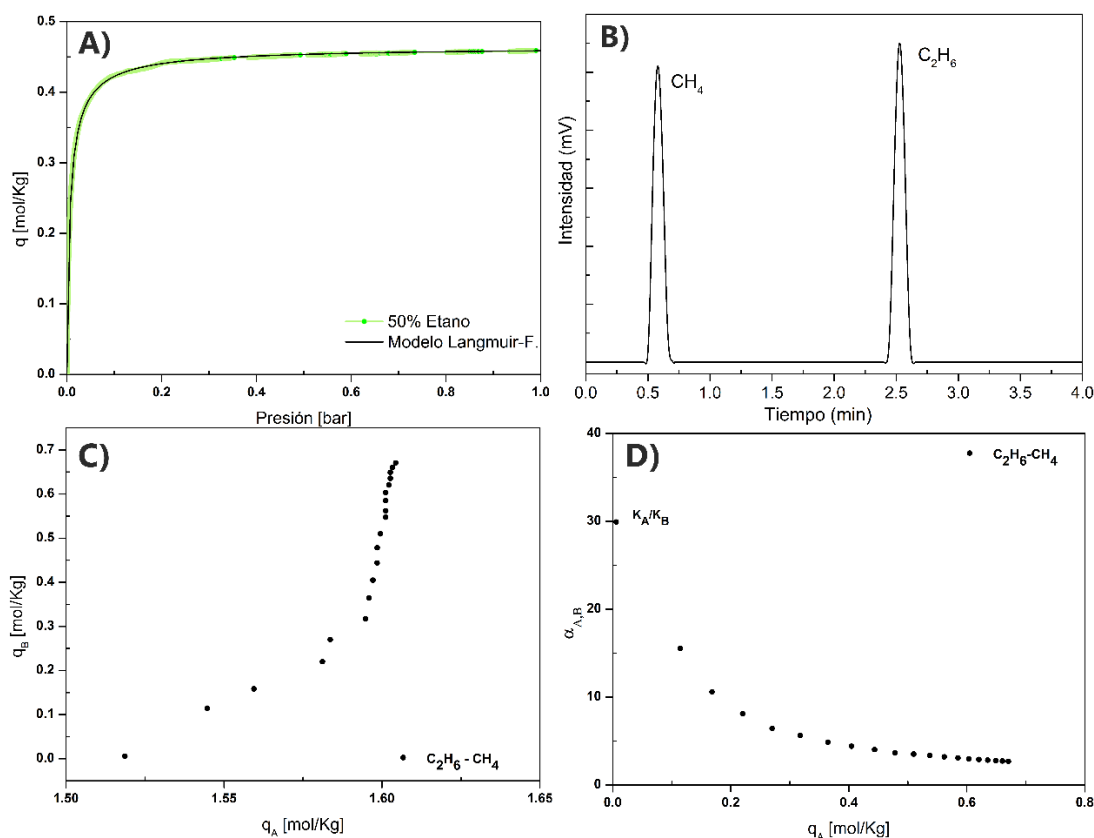
Fig. 7. Comparación de las isothermas de adsorción de etano en zeolita 5A a 298 y 308 K.

#### A. Adsorción binaria

Para la determinación de las isothermas de mezclas fue necesario conocer la composición de la corriente del efluente. Para lograrlo se integró en la ieZLC una válvula de 6 vías y una columna de separación. En el momento cero, los flujos se cambiaron a He puro, y las fracciones molares de ambos componentes en la corriente del efluente se controlaron continuamente para producir las curvas de desorción. Mediante el FID-1 fue posible

obtener la curva de desorción de la mezcla y mediante el FID-2 se logró seguir la composición de los componentes. En la Fig. 8A se observa la isoterma de mezcla, y en la Fig. 8B se muestra el cromatograma para metano y etano. Con base en los resultados obtenidos (Fig. 8C y Fig. 8D) se observa que la zeolita 5A puede llegar a ser selectiva para el etano. Esto podría deberse a una ligera polarizabilidad de las moléculas de etano respecto a las de metano. Así mismo, la diferente afinidad por el adsorbente puede atribuirse a las interacciones de polaridad inducidas con el catión divalente ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en la superficie de la zeolita [22], [30]. Con la información obtenida, es necesario estudiar otros tamices moleculares, ya que para un proceso de separación por adsorción esta selectividad de equilibrio puede llegar a no ser la más apropiada.

10



**Fig. 8.** A) Isotherma de la mezcla metano/etano (50% etano) en zeolita 5A a 298 K. B) Cromatograma de la mezcla metano/etano en zeolita 5A. C) Ruta de desorción de  $\text{CH}_4$  /  $\text{C}_2\text{H}_6$ -5A a 308 K,  $p_{A0} = p_{B0}$ . D) Variación del factor de separación con carga de  $\text{C}_2\text{H}_6$ .

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta nueva instalación experimental validan su implementación y, por otra parte, demuestran que el nuevo modelo de ZLC incorporado en ella permite determinar en una sola medición y con una mínima cantidad de adsorbente los coeficientes de difusión y las isotermas de adsorción. Por lo que la nueva instalación tiene varias ventajas sobre los sistemas tradicionales como el gravimétrico y volumétrico. Por otro lado, mediante la interfaz gráfica de usuario es posible configurar y monitorear en tiempo real el experimento a través de señales de voltaje analógicas y digitales. Al mismo tiempo es posible calcular las isotermas y

coeficientes de difusión sin necesidad de un tratamiento posterior de los datos. Estas ventajas permiten también controlar vía remota el experimento y llevar a cabo varias corridas de mediciones en una sola muestra, lo que reduce considerablemente el tiempo de medición. El método ZLC se puede extender fácilmente a la medición de equilibrios de adsorción binarios. En particular, proporciona una forma sencilla de determinar el factor de separación en función de la carga y de medir la isoterma parcial de un componente en la atmósfera del otro.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo financiero brindado por la DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IG100618 y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado. Así también se agradece al Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM-UNAM) por el uso de sus instalaciones.

#### REFERENCIAS

- [1] Industrial Technologies Program, Hybrid separations/distillation technology: *Research opportunities for energy and emissions reduction*, 2005 (Study conducted for the U.S. Department of Energy by the University of Texas at Austin, the Oak Ridge National Laboratory, and the American Institute of Chemical Engineers).
- [2] K. Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 5<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons Inc, 2010.
- [3] A. Dabrowski, "Adsorption: from theory to practice", *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 93, pp. 135–224, Oct. 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- [4] a) Z. R. Herm, E. D. Bloch, J. R. Long, "Hydrocarbon Separations in Metal–Organic Frameworks", *Chem. Mater.*, vol. 26, pp. 323, Nov. 2014. b) Z. Bao, G. Chang, H. Xing, R. Krishna, Q. Ren, B. Chen, "Potential of microporous metal–organic frameworks for separation of hydrocarbon mixtures", *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, pp. 3612, 2016.
- [5] W. Liang, Y. Wu, H. Xiao, J. Xiao, Y. Li, Z. Li, "Alternatives to Cryogenic Distillation: Advanced Porous Materials in Adsorptive Light Olefin/Paraffin Separations", *AIChE J.*, vol. 64, pp. 3390, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/sml.201900058>
- [6] Lin, J. Y., "Molecular sieves for gas separation", *Science*, vol. 353, pp. 121–122, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1126/science.aag2267>
- [7] P. J. Bereciartua, Á. Cantín, A. Corma, J. L. Jordá, M. Palomino, F. Rey, S. Valencia, E. W. Corcoran, P. Kortunov, P. I. Ravikovitch, A. Burton, C. Yoon, Y. Wang, C. Paur, J. Guzman, A. R. Bishop, G. L. Casty, "Control of zeolite framework flexibility and pore topology for separation of ethane and ethylene", *Science*, vol. 358, pp. 1068, Nov. 2017
- [8] a) R. Schoellner, U. Mueller, "Influence of Mono- and Bivalent Cations in 4A-Zeolites on the Adsorptive Separation of Ethene and Propene from Crack-Gases", *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 167, Sep. 1986. b) V. R. Choudhary, S. Mayadevi, A. P. Singh, "Sorption isotherms of methane, ethane, ethene and carbon dioxide on NaX, NaY and Na-mordenite zeolites", *J. Chem. Soc.*, vol. 91, pp. 2935, 1935.
- [9] A. Dabrowski, *Adsorption: from theory to practice. Advances in Colloid and Interface Science*, 93, pp. 135–224, 2001.
- [10] a) Z. R. Herm, E. D. Bloch, J. R. Long, *Chem. Mater.* 2014, 26, 323; b) Z. Bao, G. Chang, H. Xing, R. Krishna, Q. Ren, B. Chen, *Energy Environ. Sci.* 2016, 9, 3612; c) D. Banerjee, J. Liu, P. K. Thallapally, *Comment. Inorg. Chem.* 2015, 35, 18.
- [11] M. Eic, D. M. Ruthven, "A new experimental technique for measurement of intracrystalline diffusivity", *Zeolites*, vol. 8, pp. 40–45, Jan. 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/S0144-2449\(88\)80028-9](https://doi.org/10.1016/S0144-2449(88)80028-9)
- [12] D. M. Ruthven, S. Brandani, M. Eic. "Measurement of diffusion in microporous solids by macroscopic methods". *In Molecular Sieves - Science and Technology*, vol. 7, pp. 45–84, Dec. 2005.
- [13] BP Statistical, "Review of World Energy", [https://www.bp.com/es\\_es/spain/home/noticias/notas-de-prensa/bp-statistical-review-2019.html](https://www.bp.com/es_es/spain/home/noticias/notas-de-prensa/bp-statistical-review-2019.html), (accessed Feb. 23, 2019).
- [14] C. A. Scholes, G. W. Stevens, and S. E. Kentish, "Membrane gas separation applications in natural gas processing," *Fuel*, vol. 96, pp. 15–28, Jun 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.074>
- [15] Hydrocarbon processing, "Petrochemical Processes", [http://libros.organica1a.org/OPS1/petroquimica/Procesos\\_petroquimicos10b.pdf](http://libros.organica1a.org/OPS1/petroquimica/Procesos_petroquimicos10b.pdf), (accessed Mar. 23, 2020).
- [16] Campbell, J. (2001). Gas Conditioning and Processing. Vol. 1: The Basic Principles. Ed. Campbell Petroleum Series. USA, pp. 1–43.
- [17] Vici Valco, "valve applications", <https://www.vici.com/>, (accessed Jul. 5, 2018).
- [18] Horiba, "Mass flow controller", [https://www.horiba.com/en\\_en/](https://www.horiba.com/en_en/) (accessed Jul. 5, 2018).
- [19] J. Crank, "The Mathematics of Diffusion", London, Inglaterra, Oxford University Press, 2003.
- [20] F. Brandani, D. M. Ruthven, C. G. Coe. "Measurement of adsorption equilibrium by the zero length column (zlc) technique part 1: Single component systems", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, no. 7, pp. 1451–1461, Mar. 2003, doi: <https://doi.org/10.1021/ie020573f>
- [21] H. Wang, S. Brandani, G. Lin, X. Hu., "Flowrate correction for the determination of isotherms and darken thermodynamic factors from zero length column (ZLC) experiments", *Adsorption*, vol. 17, pp. 687–694, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s10450-011-9364-0>



- [22] S. I. Semenova , “Polymer membranes for hydrocarbo separation and removal”, *Journal of Membrane Science*, vol. 231, pp. 189-207, Mar. 2004.
- [23] D.M. Ruthven, *Principles of Adsorption & Adsorption Processes*, Canada., John Wiley & sons, 1984.
- [24] J. Karger, D.M. Ruthven, *Diffusion in Zeolites and Other Microporous Solids*, New York, E.U., Wiley Interscience:, 1992.
- [25] Mofarahi, M.; Salehi, S. M. Pure and binary adsorption isotherms of ethylene and ethane on zeolite 5A. *Adsorption* 2012, 19, 101–110.
- [26] L. García, Y. Poveda, M. Khadivi, G. Rodríguez, O. Görke, E. Esche, H. Godini, G. Wozny, A. Orjuela., “Synthesis and Granulation of a 5A Zeolite-Based Molecular Sieve and Adsorption Equilibrium of the Oxidative Coupling of Methane Gases”. *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 62, no. 4, pp.1550–1557, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00061>
- [27] Mofarahi, M.; Salehi, S. M. Pure and binary adsorption isotherms of ethylene and ethane on zeolite 5A. *Adsorption* 2012, 19, 101–110.
- [28] C.G. Coe, et al., “Chabazite for gas separation” in *Gas Separation Technology*, Amsterdam, Elsevier, 1990, pp. 149-159.
- [29] M. Ruthven, “Diffusion in type a zeolites: New insights from old data”, *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 162, pp. 69–79, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.12.025>
- [30] L. García, Y. Poveda, M. Khadivi, G. Rodríguez, O. Görke, E. Esche, H. Godini, G. Wozny, A. Orjuela., “Synthesis and Granulation of a 5A Zeolite-Based Molecular Sieve and Adsorption Equilibrium of the Oxidative Coupling of Methane Gases”. *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 62, no. 4, pp.1550–1557, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00061>

## Implementación del modelo tríada de riesgos, para determinar la probabilidad de falla en ductos: caso corrosión externa

Implementation of the risk triad algorithm to determine the probability of failure in pipelines: case of external corrosion

Juan David Betancur-Ríos<sup>1</sup>, Nora Yamile Rojas-Cataño<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0003-2362-0838> | [jdbetancourtr@udistrital.edu.co](mailto:jdbetancourtr@udistrital.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0003-2879-5899> | [nora.rojas@escuelaing.edu.co](mailto:nora.rojas@escuelaing.edu.co)

Recibido 18-11-2021, aceptado 27-01-2022

### Resumen

En este documento se describe y se trata un caso de aplicación en la industria de transporte de hidrocarburos por ductos del denominado algoritmo probabilístico de la tríada de riesgos discutido por Kent Muhlbauer (o algoritmo del Modelo de Referencia de Riesgo Cuantitativo), para establecer la probabilidad de falla (PoF) de un evento, en particular de la amenaza corrosión externa. El modelo utiliza matemática probabilística para combinar las variables y capturar tanto los impactos individuales como la acumulación de efectos menores, a través de las compuertas lógicas OR y AND. El uso de estas compuertas lógicas en modelos de riesgos representa una mejora evidente sobre la mayoría de los métodos más antiguos, ya que permite obtener una mejor representación de la forma en que se comportan los parámetros que materializan una amenaza. En este modelo, las variables que afectan la PoF se agrupan en tres categorías o elementos: exposición, mitigación y resistencia, que se representan en función de la amenaza o mecanismo de daño potencial al cual está sujeto el activo en estudio. Luego de obtener el valor de PoF, este se contrasta con los valores numéricos asociados con la probabilidad de falla en la Tabla 4.2 de API RP 581, se cruza con los resultados de CoF y de este modo se obtiene un ranking de riesgo que permite optimizar los recursos al aplicarlos a los activos de mayor riesgo. Se presentan los resultados luego de aplicarlos a la amenaza corrosión externa.

**Palabras clave:** análisis de riesgo en ductos, probabilidad de falla, corrosión externa.

### Abstract

This paper describes and discusses a case of application in the hydrocarbon transportation industry of the so-called risk triad probabilistic model discussed by Kent Muhlbauer (or Quantitative Risk Reference Model algorithm), to establish the probability of failure (PoF) of a pipeline event, in particular the external corrosion threat. The model uses probabilistic mathematics to combine the variables and capture both individual impacts and the accumulation of minor effects through OR and AND logic gates. The use of these logic gates in risk models represents a distinct improvement over older methods, as it provides a better representation of how the parameters that materialize a threat behave. In this model, the variables affecting the PoF are grouped in three groups or elements, exposure, mitigation and resistance, which are a function of the threat or potential damage mechanism to which the asset under study is subject. After obtaining the PoF value, it is contrasted with the numerical values associated with the probability of failure in Table 4.2 of API RP 581, it is crossed with the CoF results and thus a risk ranking is obtained that allows optimizing resources by applying them to the highest risk assets. The results are presented after applying them to the external corrosion threat.

**Index terms:** pipeline risk analysis, probability of failure, external corrosion.

## I. INTRODUCTION

Pipeline and production facility integrity management regulations and standards require a risk analysis to comprehensively assess the internal and external factors affecting the assets (pipelines and production facilities) and the severity of their consequences, which allows determining the level of risk as a basis for maintenance work. Since maintenance budgets may be limited by economic constraints, operating companies must decide how to best allocate available resources. Optimal resource allocation involves identifying high-risk segments and determining integrity maintenance activities for those segments that will lead to the greatest reduction in overall operational risk, in which a risk management is critical.

2

Risk management provides strategies, processes, resources and tools to monitor, recognize, and address a risk event. Pipeline standards and regulations increasingly require operating companies to use risk management to ensure pipeline safety [1]. In general, risk management includes risk assessment (risk analysis and risk evaluation) and risk control, as shown in Figure 1 [2].

Risk analysis process considers the following activities:

- System definition.
- Collection, review and integration of information.
- Identification of hazards that may become significant threats to the integrity of the pipeline (hazard and threat susceptibility).
- Determination of the frequency or probability of occurrence (PoF) of an event due to such hazards.
- Determination of the severity of the potential consequences (CoF) of such an event to the population, business, environment, and reputation.
- Estimation risk, calculated as  $R = \text{PoF} \times \text{CoF}$ , and represents it in levels or through a matrix or a risk plot.

Risk evaluation consists of comparing the level of risk obtained against the acceptance criteria established by the Company. Risk control involves carrying out prevention, mitigation and monitoring activities focused on risk reduction.

Based on the results of the risk analysis, the risk level per asset or segment is obtained, reflecting the differences in risk due to the changes and damage/threat mechanisms to which the assets are exposed, which allows prioritizing the equipment that requires attention.

This paper describes the Quantitative Risk Reference Model algorithm (called risk triad algorithm) to determine the PoF on pipelines. The risk calculation algorithm will be illustrated through two examples and a detailed case study on the PoF to which three segments of a pipeline are exposed to external corrosion threat. Subsequently, the cost of a potential consequence will be assumed, and the risk obtained will be calculated ( $R = \text{PoF} \times \text{CoF}$ ) and ranked, following the API RP 581 references [3].

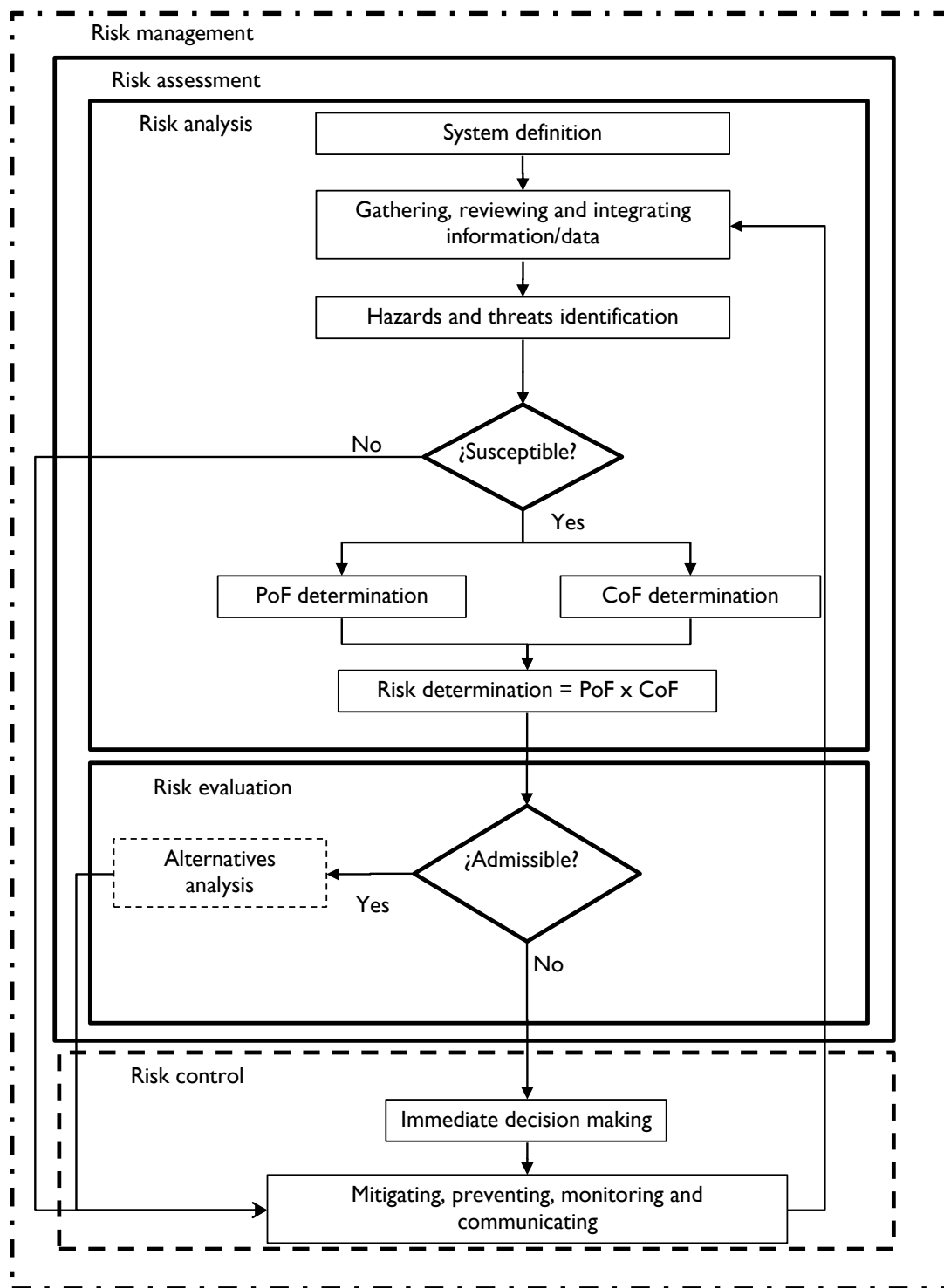


Fig. 1. Risk Management Process. Source: adapted from CSA Z662 [2].

## II. PIPELINE RISK ANALYSIS

Among the different methods or models that meet the objectives to determine pipeline risk analysis, the following are included [2]:

- Qualitative: mainly uses expert judgment, primary maintenance and operation information; wide evaluation ranges, where PoF and CoF estimates are expressed separately, and their combinations are presented in a two-dimensional matrix of discrete risk categories.
- Semi-quantitative: also known as indexing approach (weighting) or risk score methods, in which the factors influencing PoF and CoF are assigned values or categories, which are then mathematically combined, to risk ranking of the assets.
- Quantitative: corresponds to probabilistic methods of risk analysis, where logical models of event trees and fault trees are implemented; in which the PoF and CoF are quantitatively estimated and then mathematically combined. It requires more detailed, precise, and accurate information.

Most pipeline operating companies use qualitative or semi-quantitative risk assessments, where risk is characterized (or classified) but not quantified. The Quantitative Risk Reference Model algorithm (called risk triad algorithm) let to calculate the PoF on pipelines. The principal elements of the risk analysis shown in Figure 1 are detailed below, with special emphasis on the algorithm for calculating the PoF for the external corrosion hazard.

### A. System definition

This part of the risk analysis is concerned with specifying which asset the study will apply to. The system can be a pipeline or the process piping system within an industrial plant. The type of system is also related to the type of information to be collected.

### B. Gathering, reviewing, and integrating information

Relevant information is collected to identify hazards, threats and critical locations, for example, high consequence areas (HCA). The information is collected by means of field trips with specialized personnel and equipment and adequate planning. The minimum information required includes:

- Pipeline characteristics.
- Design and construction data.
- Process flow diagrams.
- Environment characteristics.
- Operating data.
- Inspection, monitoring, repair, and maintenance records.
- Change management histories.
- Specific studies such as HAZOP (Hazard and Operability Analysis), RCM (Reliability Centred Maintenance), geotechnical diagnostics.
- Other.

The precision and accuracy of the input data for the risk assessment has a direct influence on its results, especially in relation to the accuracy of the results obtained. It is recommended that the information be uploaded and stored in a geo-referenced digital database and/or a geographic information system, which allows the results of the risk analysis to be easily visualized.

### C. Segmentation

Segmentation refers to the identification of similar characteristics that allow a system to be divided into parts or components with the same expectation of deterioration. It can be segmented by parameters associated with the asset or with the environment, as shown in Table 1.

TABLE 1  
SOME TYPICAL PARAMETERS TO PERFORM SEGMENTATION.

Segmentation by parameters associated with the asset	Segmentation by parameters associated with the environment
<ul style="list-style-type: none"> <li>Construction: material, wall thickness, type of coating,</li> <li>Operation: pressure, temperature, flow.</li> <li>Mitigation: cathodic protection system + coating, chemical corrosion control treatment,</li> <li>Others</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hazard of the contained product,</li> <li>Operation: pressure, temperature, inventory,</li> <li>Characteristics of the area: topography, seismicity, rainfall.</li> <li>Existence of early detection and leak isolation systems.</li> <li>Other</li> </ul>

#### D. Hazards and threats identification

Once the information has been collected, reviewed, and integrated, the hazards that can evolve and become threats to the integrity of the pipeline are identified. The threats that can affect pipeline integrity are grouped into twelve (12) categories, classified according to NTC 5901 [4], API 1160 [5], and ASME B31.8S [6]. A general classification according to their time-dependence of threats to pipeline integrity is shown in Table 2.

TABLE 2  
CLASSIFICATION OF THREATS ACCORDING TO TIME DEPENDENCY (ADAPTED FROM [4], [5], [6]).

Time-dependent threats	Possible time-dependent threats	Time-independent threats
<ol style="list-style-type: none"> <li>External Corrosion.</li> <li>Internal Corrosion.</li> <li>Selective seam corrosion.</li> <li>Growth of anomalies of some previous cause by pressure cycles (fatigue).</li> <li>Environmentally assisted cracking, including stress corrosion cracking (SCC), hydrogen induced cracking (HIC and SOHIC) and sulfide stress cracking (SSC).</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Manufacturing Defects.</li> <li>Construction and Fabrication Defects.</li> <li>Mechanical Damage: previous damage to the pipeline causing a delay in failure - vandalism.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Failure of equipment other than piping: pumps, valves, seals, traps).</li> <li>Incorrect operations: over-pressurization, overfilling of tanks.</li> <li>Mechanical damage causing immediate failure - vandalism.</li> <li>Weather and External Forces.</li> </ol>

Among the methods used to perform the identification are:

- Structured methods, such as operational hazard studies (HAZOP) and failure mode and effects analysis (FMEA).
- Comparative methods, such as checklists, hazard indices, and reviews of in-house or industry failure histories.
- Methods that provide a logical path, such as fault tree analysis.

#### E. Probability of failure (PoF) determination

*Overview.* The PoF model discussed in this paper corresponds to a new way that establishes relationships among failures inducing factors, their corresponding failures times and failure phenomena by understanding the physical process leading to the failure mechanism. This was introduced by Kent Muhlbauer on pipelines, called the risk triad or Quantitative Risk Reference Model algorithm, as shown on the left side of Fig. 2, in which the variables that affect the PoF are classified in three factors: exposure factor, mitigation factor and resistance factor measured or estimated in verifiable and commonly used units of measurement [7], [8], [9], [10].

6

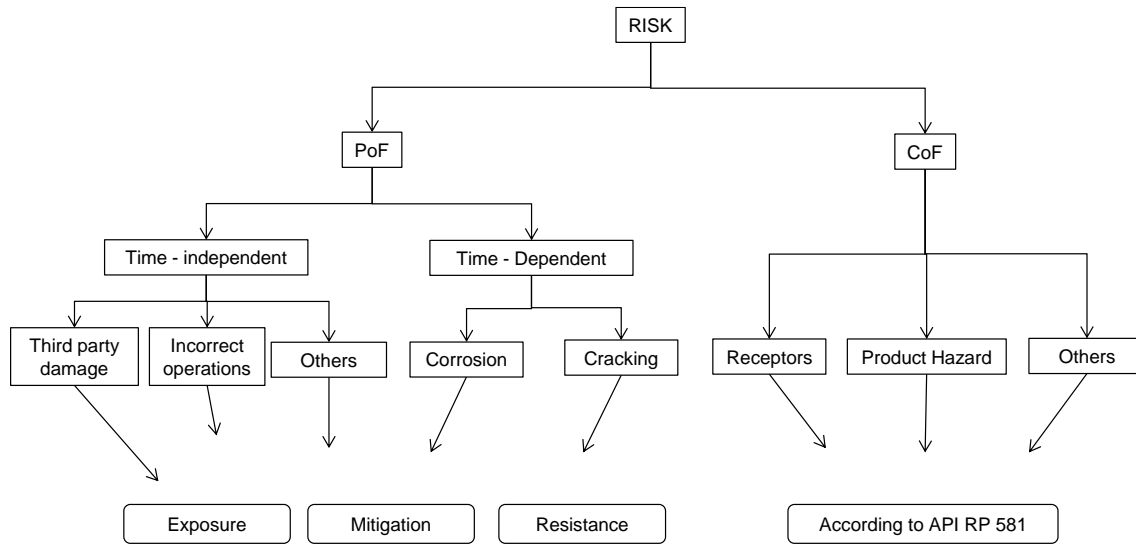


Fig. 2. General Risk Model discussed in this paper. Adapted from [8], [9].

- Exposure (attack) factor: refers to the type and unmitigated aggressiveness of each process that can precipitate failure (the component is taken to be completely unprotected and highly vulnerable to failure). It is expressed in units of "events per time and distance", i.e., events/km-year or events/mile-year. In other words, an exposure event is an event that, in the absence of mitigation and resistance, will result in a failure. To estimate exposure, the component is taken to be completely unprotected and highly vulnerable to a failure.
- Mitigation factor (defense): refers to the type and effectiveness of each mitigation measure designed to block or reduce an exposure. It is measured in units of percentage (%).
- Resistance factor: refers to the measure or estimate of the system's ability to absorb damage without failure. In other words, it is the ability of the system to resist failure in the presence of the failure mechanism. It is measured in units of percent (%).

Mitigation and resistance are measured in units of %, which represents "fraction of damage or failure scenarios avoided". For example, a mitigation effectiveness of 90% means that 9 of the next 10 exposures will not result in damage. A resistance of 60% means that 40% of the following damage scenarios will result in failure, 60% will not.

This model uses the same data as the qualitative and semi-quantitative approaches to help with continuity and keep conversion costs down but uses them in a different way. The modifications to the main algorithm consist of simple, straightforward changes to the categorization of variables and the mathematics used to combine them to calculate risk scores. The new algorithms are easily set up and run-in spreadsheets or a desktop database, i.e., no specialized software is needed.

Among the advantages of this algorithm are it allows differentiation between absolute exposure to a hazard, mitigation effectiveness and system resistance, which leads directly to better risk management decisions; it eliminates the need to reweight variables; and it allows greater flexibility to present results in absolute (probabilistic) or relative terms, depending on the user's needs. However, the new assessments are more verifiable and defensible, as they are based on absolute rather than relative terms, although it requires investing some time and energy in establishing the new assessment model with legitimate values for the systems being assessed [7], [8], [9], [10].

Table 3 summarizes the units used in the model for time-independent hazards such as third-party damage and those associated with weather and external forces.



TABLE 3  
MEASUREMENT UNITS USED FOR TIME-INDEPENDENT THREATS.

Variable	Unit used
Exposure (time independent)	events/km · year
Mitigation	%
Resistance	%
Probability of failure	events/km · year
Consequence of failure	USD\$/event
Calculated risk	USD\$/km · year
Risk per segment	USD\$/year

Table 4 summarizes the units used in the model for time-dependent hazards such as internal corrosion and external corrosion, specifically mils per year (mpy), where mils is one thousandth of an inch. The mpy values lead to an estimate of Time To Failure (TTF), define as the time period before failure would occur, under the wall loss and available strength assumptions. In other words, TTF is the time before the pipeline fails given the pipe wall thickness and the rate of wall loss from corrosion mechanisms.

TABLE 4  
MEASUREMENT UNITS USED FOR TIME-INDEPENDENT THREATS.

Variable	Unit used
Exposure (time dependent)	mpy*
Mitigation	%
Resistance	mils**
Probability of failure	per km – year
Consequence of failure	USD\$/year
Calculated risk	USD\$/ km-year

- \*mpy (mils per year).
- \*\*mils (one thousandth of an inch).

*Logic gates.* The algorithm uses the tree structure for estimating the PoF from the probabilities of the underlying basic event, through OR and AND Gates to connect an output event with the associated input events, where the collective effect of the components failures could lead to a system failure. OR and AND Gates are logical symbols that represent events that can be defined by one or more lower level events. The use of these logic gates in risk models represents a distinct improvement over older methods, as it allows for a better representation of how the parameters that materialize a hazard behave.

*OR gates.* OR gates imply independent events which are additive (note: two events are independent if the knowledge that one occurred does not affect the chance the other occurs). The OR gate function calculates the probability of any of one (or more) of the inputs events could case the output event occur.

According to statistical theory [11], [12], [13], if  $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_n$  be independent events, the probabilities of those events are  $P_1$ ,  $P_2$  and  $P_n$ . Since the probability that event  $E_1$  happens is  $P_1$ , then the probability that it does not happen is  $1 - P_1$ . Similarly, the probability of non-happening of event  $E_2$  is  $1 - P_2$ , and the probability of non-happening of event  $E_n$  is  $1 - P_n$ .

Now, the probability of non-happening of any of the events is:  $(1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n)$ .

Thus, if there are  $i$  input events, each assigned with a probability of occurrence  $P_i$ , then the probability  $P_{OR}$  that any  $i$  events' occurring is given by [9], [11]:

$$P_{OR} = 1 - (1 - P_1) * (1 - P_2) * \dots * (1 - P_n) \quad (1)$$

The OR gate is used for calculating the overall mitigation effectiveness from several mitigation measures. This function captures the idea that probability rises due to the effect of either a single factor with a high influence or the accumulation of factors with lesser influences (or any combination), as follows:

$$\%M = 1 - [(1 - \%M_1) * (1 - \%M_2) * \dots * (1 - \%M_n)] \quad (2)$$

The OR gate is also used for calculating the overall resistance from several resistance factors, as follows.

$$\%R = 1 - [(1 - \%R_1) * (1 - \%R_2) * \dots * (1 - \%R_n)] \quad (3)$$

∞

$M_i$  and  $R_i$  being each of the mitigation and resistance factors contemplated in the model that implies dependent events. Each  $M_i$  is effective in a certain percentage to prevent failures in the studied pipe segment, reflecting its potential impact on risk reduction.

**AND Gates.** The use of the AND gate implies dependent events that must be combined by multiplication, where any sub variable can have a huge influence. For instance, when all events in a series happen and there is dependence among the events, then the result is the product of all probabilities. The probability of failure in this case is calculated as follows [9], [10]:

$$P_{AND} = (P_1) * (P_2) * \dots * (P_n) \quad (4)$$

#### F. PoF calculation for time-independent threats

Reducing the probability of failure occurs by reducing the exposure to the hazard through mitigation or reducing the probability of failure through resistance. To evaluate PoF from time-independent failure a mechanism, those that appear random and do not worsen with time, then it is considered that PoF is modulated by the mitigation effectiveness and resistance factors, as follows:

$$PoF = Exposure * (1 - \%M) * (1 - \%R) \quad (5)$$

In other way, having good mitigation effectiveness and adequate resistance reduces asset exposure, which implies that PoF is reduced.

**Example 1.** For third party threat, an exposure factor of 0,2 events/km-year was found, i.e., one event every five years, on a given pipeline segment. Applying several mitigation actions, a total mitigation of 95% was obtained.

The mitigation factors can be the one call system ( $M_1 = 20\%$ ), the Right-of-Way surveillance ( $M_2 = 20\%$ ), the protective measures ( $M_3 = 60\%$ ), and the depth of cover ( $M_4 = 80\%$ ). Then, the total

$$\begin{aligned} \%M &= 1 - [(1 - \%M_1) * (1 - \%M_2) * \dots * (1 - \%M_n)] \\ &= 1 - [(1 - 0,2) * (1 - 0,2) * (1 - 0,6) * (1 - 0,8)] = 0,95. \end{aligned}$$

Similarly, a total resistance of 75% was obtained. The resistance factor can be due to API Grade Pipe Specification ( $R_1$ ) and diameter/thickness ratio ( $R_2$ ) of the pipe, among others selected by each company. What is the PoF?

Situation data are:

- Exposure = 0,2 events/km-year,
- %Mitigation = 0,95,
- %Resistance = 0,75.

Applying equation (5) we obtain:

$$\begin{aligned} PoF &= Exposure * (1 - \%M) * (1 - \%R) \\ &= 0,2 \frac{events}{km-year} * (1 - 0,95) * (1 - 0,75) = 0,0025 \frac{events}{km-year}. \end{aligned}$$

Thus, the PoF is 0,0025 failures (event) per km-year or  $2,5 \times 10^{-3}$  failures per km-year.

9

### G. PoF calculation for time-dependent threats

To describe the PoF behavior for time-dependent hazards, such as internal and external corrosion, the PoF model with the shortest time to failure (TTF) is used to consider the time degradation. Failures behaviors refer to the observations changes of states which occur during the failure process and are characterized by recording Time To Failure of the component. TTF defines the time when the system no longer meets its design specifications (the time a component is expected to fail).

The TTF is proportional to the resistance (the greater the resistance, the longer the life of the asset) and is inversely proportional to the exposure level modulated by the resulting mitigation (the lower mitigated exposure, the longer life of the asset), as shown below:

$$TTF = \frac{Resistance}{Exp*(1-\%M)} \quad (6)$$

In a conservative approximation, and considering constant failure rate, TTF can be taken as the inverse of the PoF ( $TTF = \frac{1}{PoF}$ ) [13]. Thus,

$$PoF = \frac{Exp*(1-\%M)}{Resistance} \quad (7)$$

**Example 2.** Assume a pipeline of 0,25 in nominal thickness. It has been determined that soil corrosivity creates an external corrosion exposure of 4,0 mpy. Two mitigation systems are considered: one the coating with a mitigation effectiveness of 70% and second the cathodic protection system with a mitigation effectiveness of 80%.

For external corrosion, the resistance factor considered is the remaining wall thickness. Wall thickness measurements were made and, considering the inherent uncertainty of the measurement, an effective wall thickness ( $\tau$ ) of 0,220 in, (i.e.  $\tau = 220$  mils) was obtained. Determine the PoF for external corrosion threat.

Situation data are:

- Exposure = 4,0 mpy
- Coating mitigation ( $M_1$ ) = 0,70
- Cathodic protection mitigation ( $M_2$ ) = 0,80
- Resistance = 0,220 in = 220 mils

Calculations: the total percent mitigation (%M) is:

$$\%M = 1 - [(1 - \%M_1) * (1 - M_2)] = 1 - [(1 - 0,7) * (1 - 0,8)] = 0,92$$

Now, applying the equation (6) and (7):

$$TTF = \frac{220 \text{ mils}}{4.0 \text{ mpy}*(1-0,92)} = \frac{55}{(1-0,92)} \text{ years} = \frac{55}{0,08} \text{ years} = 687,5 \text{ years}.$$

$$PoF = \frac{1}{TTF} = \frac{1}{687,5 \text{ years}} = 0,00125 \text{ per km} - \text{year} = 1,25 \times 10^{-2} \text{ per km} - \text{year}.$$

#### H. Consequence of failure (CoF) determination

To determine the CoF, the guidelines of API RP 581 are followed (as shown on the right side of Figure 2), expressing the consequence results in USD\$/event. Based on this, the risk is expressed in USD\$/km - year.

10

#### I. Ranking risk

To qualify the risks results obtained ( $R = PoF \times CoF$ ), the methodology of numerical values associated with the probability and consequence of failure considered in the recommended practice API RP 581, shown in Table 5, is followed, specifically in its “Table 2: Numerical Values Associated with PoF and Financial-based CoF Categories”. The results of the Examples 1 and 2 indicates that PoF in the Very High and High category respectively.

*Note:* Each Company may select the corresponding ranges.

TABLE 5  
NUMERICAL VALUES ASSOCIATED WITH POF, COF AND RISK QUALIFICATION  
(ADAPTED FROM API RP 581 [3]).

Probability Category		Consequence Category (API RP 581)		Risk Category	
Category (API 581)	API RP 581 Probability Range	Category (API 581)	Range (USD\$)	Resultant Range (USD\$/km - year)	Authors Risk Qualification
1	$PoF \leq 3,06E-05$	A	$CoF \leq 10\,000$	$R \leq 3,06E-01$	Very Low
2	$3,06E-05 < PoF \leq 3,06E-04$	B	$10\,000 < CoF \leq 100\,000$	$3,06E-01 < R \leq 3,06E+01$	Low
3	$3,06E-04 < PoF \leq 3,06E-03$	C	$100\,000 < CoF \leq 1\,000\,000$	$3,06E+01 < R \leq 3,06E+3$	Medium
4	$3,06E-03 < PoF \leq 3,06E-02$	D	$1\,000\,000 < CoF \leq 10\,000\,000$	$3,06E+3 < R \leq 3,06E+05$	High
5	$PoF > 3,06E-02$	E	$CoF > 10\,000\,000$	$R > 3,06E+05$	Very High

### III. PIPELINE APPLICATION: PoF FOR EXTERNAL CORROSION THREAT

In a survey of recent studies reported in the literature, external corrosion pitting is found to account for approximately 70% of the failures occurring in oil and gas transportation systems in Europe from the early 1970s to the mid-2000s [14], [15]. In the USA between 2002 and 2008 according to reports from the OPS (the Office of Pipeline Safety), pitting corrosion caused 79% of total incidents in oil and gas transportation systems, making it one of the most relevant threats to manage.

#### A. Methodology

To implement the Quantitative Risk Reference Model algorithm to calculate the PoF for a real case, a natural gas pipeline transportation operator was taken. The algorithm was applied to determine the PoF for the external corrosion threat. The effective wall thickness ( $\tau$ ) was taken from the Example 2 ( $\tau = 220$  mils).

Several risks workshops were held with the participation of personnel from operations, maintenance and mainly from mechanical integrity management of the asset. In the workshops, the generalities of the risk triad model

were shown and then they began to discuss which variables formed the exposure factor, which the mitigation factor and which the resistance factor, based on a previous experience in semi-quantitative PoF algorithm. The mitigation percentages were established by consensus among the participants.

## B. Results and Discussion

*Exposure factor.* Since external corrosion is a time-dependent threat, the exposure factor is expressed in mpy. If corrosion rate data by ILI inspection or other technique are available, these values will be used as the exposure factor. Other exposure factors, such as type of soil and electrical interference, will also be considered.

The ranges and criteria for exposure and mitigation factors are based on those provided by the National Association of Corrosion Engineers (NACE) in their standards, handbooks, and articles. As a second option, we used articles or academic texts recognized in the industry.

Each operator is able to select the weight for corrosiveness; i.e., it can be 1 to 5 mpy or 1 to 10 mpy. Normally, this is done based on the corrosion trend behavior. Corrosiveness degree should be selected based on the industry's best practices, such as AMPP - NACE (Association for Materials Protection and Performance - National Association Corrosion Engineer) or API (American Petroleum Institute) standards.

When there are four options to the exposure factor category, the one with the least impact is assigned 1 mpy, the next 3 mpy, the next 4 mpy, and the one with the greatest impact 5 mpy. For example, in the case of soil aggressiveness based on chloride concentration, there are four ranges, as shown in Table 6.

TABLE 6  
CHLORIDE-RELATED EXPOSURE FACTOR SPLIT.

Factor	Corrosiveness degree	Assigned Weight (mpy)	Reference Criteria
Chlorides (ppm: parts per million)	> 5 000	5	NACE Corrosion Engineer`s Reference Handbook. Third Edition, 2002 [16].
	1 500 – 5 000	4	
	500 – 1 500	3	
	< 501	1	

If there were only three choices, then the smallest is assigned 1 mpy, the next 3 mpy and the largest 5 mpy, as used here.

Three exposure factors were taken in this document, analyzed through nine parameters, as evidenced in Table 7. The first exposure factor is the pitting corrosion rate, the second is the soil corrosivity, and the third is the electrical interference.

The pitting corrosion is obtained from inspection tool, as In Line Inspections (ILI) and using the NACE SP0775-13 (Table 2: Qualitative Categorization of Carbon Steel Corrosion Rates for Oil Production Systems) to classify the corrosion growth rate. The soil corrosivity is described by the type of soil [17]; the presence of pollutants, chlorides and sulfates [16]; the soil resistivity [16]; the REDOX potential [18], and the presence of sulfate-reducing bacteria (BSR) [19].

The third exposure factor refers to alternating current (AC interference) electric interference and is obtained from electric interference studies under NACE SP0177-2019 standard (Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems).

Three segments with the following characteristics were taken for the assessment:  $S_1$  with a high exposure,  $S_2$  with an intermediate exposure and  $S_3$  with a low exposure (Table 7). If all factors are weighted with a value of 1, the minimum total exposure would be 9 (as shown for the segment  $S_3$ ) and if all are weighted with a value of 5, the maximum total would be 45 (as shown for the segment  $S_1$ ), according to the results of the risk analysis workshops.

TABLE 7  
SKETCH OF THE EXPOSURE FACTOR ESTABLISHED FOR EXTERNAL CORROSION THREAT.

Exposure factor category		Obtained by	Corrosiveness degree	Assigned Weigh (mpy)	S <sub>1</sub> Exposure (mpy)	S <sub>2</sub> Exposure (mpy)	S <sub>3</sub> Exposure (mpy)
Pitting corrosion rate	1.	ILI runs	> 8 3 - 7.8 < 2.7	5 3 1	5	3	1
	2.	Soil type	Clay, humus, peat; leachates, garbage	5	5	1	1
			Mud, sand	3			
lime, sandy loam			1				
soil corrosivity	3.	Pollutants	Present Not present	5 1	5	5	1
	4.	Chlorides (ppm)	> 5000	5	5	4	1
			1500 - 5000	4			
			500 - 1500	3			
			< 501	1			
	5.	Sulfates (ppm)	> 10 000	5	5	4	1
			150 - 1000	4			
			150 - 1500	3			
			< 151	1			
	6.	Resistivity (ohm-cm)	0 - 1000	5	5	3	1
			1000 - 10000	3			
			> 10000	1			
7.			REDOX potential (mV/hydrogen electrode)	< 100			
	201 - 400	3					
	> + 400	1					
8.	BSR (cfu/ml)	> 100	5	5	5	1	
		< 100	1				
Electrical interference	9.	AC interference	There is Not present	5 1	5	1	1
	Total exposure per segment				45	29	9

Then, the minimum value obtained is 9 mpy and the maximum value is 45 mpy. These values must be adjusted to the initially selected scale (1- 5 mpy), according to Table 8.

TABLE 8  
WEIGHTING RANGE FOR EXPOSURE FACTOR.

Weighting assigned Range selected	Total Weighting range per segment	Assigned Exposure (mpy)
0 – 20	$S_3 = 9$	1,0
21 – 32	$S_2 = 29$	3,0
33 – 45	$S_1 = 45$	5,0

**Mitigation factor.** The mitigation factors are related to the coating, the cathodic protection system, the inspections performed on the coating (type and frequency) and the remaining indications (coating and pipe) after repairs (Table 9).

The mitigation percentage was determined according to expert judgment and the operator's experience, as follow:

- A high percentage of mitigation was taken for  $S_1$ .
- the worst percentage of mitigation was taken for  $S_2$  and,
- An intermediate percentage of mitigation was taken for  $S_3$  giving credit to the coating system and compliance with NACE Cathodic Protection criteria.

The mitigation factors taken into account are coating type (FBE or coal tar); coating age; NACE Cathodic Protection compliance; DCVG inspections and repair program.

TABLE 9  
MITIGATION PERCENTAGES THAT WERE SELECTED FOR EXTERNAL CORROSION.

Mitigation factors selected to external corrosion threat						
Factor	Name	Description	Mitigation assigned	$S_1$ Mitigation	$S_2$ Mitigation	$S_3$ Mitigation
M1	Coating type	FBE	60%	60%	-40%	60%
		Coal tar	-40%			
M2	Coating age	less than 10 years	40%	40%	5%	40%
		greater than 10 years	5%			
M3	NACE CP criteria	Complies	40%	40%	-60%	-60%
		Does not comply	-60%			
M4	DCVG inspections results	Complies with program	40%	40%	-40%	-40%
		Does not meet	-40%			
M5	% of compliance with repairs arising from DCVG	90% of the program	80%	80%	-60%	-60%
		50% compliant	50%			
		0%	-60%			

The % $M$  per segment was performed according to equation (3), based on the mitigation factors that, in the expert's opinion, apply to each exposure factor category (Table 10).

For example, to mitigate the pitting corrosion (the first exposure factor), all mitigation measures apply. Then, for segment  $S_1$ , the total mitigation percentage obtained is:

$$\%M_{S1\_pitting} = 1 - [(1 - \%M_1) * (1 - \%M_2) * \dots * (1 - \%M_5)]$$

$$\%M_{S1\_pitting} = 1 - [(1 - 0,6) * (1 - 0,4) * (1 - 0,4) * (1 - 0,4) * (1 - 0,8)] = 0,97$$

For soil corrosivity applied  $M_1$  and  $M_2$  mitigations, then:

$$\%M_{S1\_soil} = 1 - [(1 - 0,6) * (1 - 0,4)] = 0,76$$

For  $S_3$  segment, we obtain:

$$\%M_{S3\_pitting} = 1 - [(1 - 0,6) * (1 - 0,4) * (1 + 0,6) * (1 + 0,4) * (1 + 0,6)] = 0,14$$



When the mitigation percentage is less than zero, or takes negative values, as for  $S_2$  segment, indicates that there is no active mitigation, therefore a value of zero is taken.

To obtain the total mitigation for each segment, an OR logic gate is applied for the exposure factor category that applies. For example, for segment 3, we have:

$$\begin{aligned} \%M_{S3} &= 1 - \left[ (1 - \%M_{S3_{pitting}}) * (1 - \%M_{S3_{soilcorr}}) * (1 - \%M_{S3_{AC}}) \right] \\ &= 1 - [(1 - 0,68) * (1 - 0,76) * (1 - 0,0)] = 0,92 \end{aligned}$$

14

TABLE 10  
PERCENTAGE EFFECTIVENESS MITIGATION FOR EACH SEGMENT.

Mitigation for each segment					
Exposure factor		Mitigation factor that applies to exposure	$S_1$ Mitigation	$S_2$ Mitigation	$S_3$ Mitigation
Pitting corrosion rate	ILI run, other	M1 through M5	97%	0%	14%
Soil corrosivity	Soil type	M1, M2	76%	0%	76%
	Contaminated soil				
	Chlorides (ppm)				
	Sulfates (ppm)				
	Resistivity (ohm-cm)				
	REDOX potential (mV/hydrogen electrode)				
	Bacteria BSR (cfu/ml)				
Electrical interference	AC	N/A	0%	0%	0%
Total mitigation per segment			99%	0%	79%

Comparing  $S_1$  and  $S_2$  mitigation results, it can be seen then that complying with the DCVG inspection and coating repair program is very important to ensure the integrity of the pipeline, in order to obtain a high percentage of mitigation, which is in line with the experience of most companies to control the external corrosion threat.

The mitigation percentage ( $M_3$  factor) for the cathodic protection system was taken according to compliance with NACE SP0169 criteria, as shown in Table 11.

TABLE 11  
BREAKDOWN OF M3 MITIGATION FACTOR.

Name	Range and measurement unit	Mitigation (%)
<p>15</p> <p>Compliance with NACE criteria for cathodic protection based on CIPS inspection results (trend greater than 90%).</p> <p>Instant OFF potential with reference to the electrode Cu - CuSO4</p>	Aerial pipeline	0%
	Protected:	
	A structure-electrolyte polarized potential of at least -850 mV or more negative.	
	A minimum of 100 mV cathodic polarization, measured between the surface of the structure and a stable reference electrode in contact with the electrolyte.	40%
	If bacteria are present (BSR), the temperature is higher than 40 C or in weak acidic environments: polarized potential of at least - 950 mV or more negative.	
	Unprotected:	
	Instant OFF potential below -850 mV.	-40%
	Over protected:	-40%
	Instant OFF potential above -1200 mV.	
		-60%
	No inspection	

For the mitigation factor related to the results of the DCVG technique, the criteria in Table 12 are followed [20].

TABLE 12  
BREAKDOWN OF M3 MITIGATION FACTOR.

Indication Classification	DCVG Inspection criteria	Mitigation (%)
Severe	IR% > 60 %, C/A ó A/A	-40%
Moderate	35 % < IR% < 60 % ó C/N	30%
Minor	IR% < 35 % y C/C	50%
No indication	(Points where no damage to the coating was detected)	60%

*Resistance factor.* The resistance factor in this case corresponds to the minimum remaining wall thickness. For all segments under study, are taken 220 mils. Thus, PoF is finally calculated according to equation (7), which for each of the segments studied.

For  $S_i$  segment, we have:

$$PoF_{S_1} = \frac{Exp_{S_1} * (1 - \%M_{S_1})}{Resistance_{S_1}} = \frac{5 \text{ mpy} * (1 - 0,99)}{220 \text{ mils}} = \frac{2,27 \times 10^{-4} \text{ events}}{\text{km} - \text{year}}$$

In summary, although there is a large exposure, the mitigation measures are effective and therefore the PoF is low.

For  $S_2$  segment, we have:

$$PoF_{S_2} = \frac{Exp_{S_2} * (1 - \%M_{S_2})}{Resistance_{S_2}} = \frac{3 \text{ mpy} * (1 - 0)}{220 \text{ mils}} = \frac{1,36 \times 10^{-2} \text{ events}}{\text{km} - \text{year}}$$

For  $S_3$  segment, we have:

$$PoF_{S_3} = \frac{Exp_{S_3} * (1 - \%M_{S_3})}{Resistance_{S_3}} = \frac{1 \text{ mpy} * (1 - 0,92)}{220 \text{ mils}} = 3,6 \times 10^{-3} \frac{\text{events}}{\text{km} - \text{year}}$$

According to API RP 581 categories,  $S_1$  (which, although it has a high exposure, also has a high percentage of mitigation,) is in category 1 (PoF Low);  $S_2$  (the worst mitigation percentage) is in category 4 (PoF High), and  $S_3$  is in category 3 (PoF medium).

If the potential consequence of failure have a cost of USD\$1'010,000/event (Consequence Category D, according to API RP 581 criteria, Table 5), then the risk ( $R = PoF * CoF$ ) determined for each segment obtained is shown in Table 13.

TABLE 13  
PoF AND RISK CATEGORY FOR EACH SEGMENT UNDER STUDY.

PoF for each segment (Events/km-year)	$S_1$	$S_2$	$S_3$
	$2,27 \times 10^{-4}$	$1,36 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-3}$
Risk for each segment (USD\$/km - year)	$2,29 \times 10^1$	$1,37 \times 10^4$	$3,6 \times 10^3$
Risk Category (Table 5)	Low	High	Medium

We can show the results in a balance risk matrix as shown in Figure 3.

CoF	PoF				
	$PoF \leq 3,06E-05$	$3,06E-05 < PoF \leq 3,06E-04$	$3,06E-04 < PoF \leq 3,06E-03$	$3,06E-03 < PoF \leq 3,06E-02$	$PoF > 3,06E-02$
E	Low	Medium	High	High	Very High
D	Very Low	$S_1$	$S_3$	$S_2$	High
C	Very Low	Low	Medium	Medium	High
B	Very Low	Very Low	Low	Medium	Medium
A	Very Low	Very Low	Very Low	Low	Low

Fig. 3. Risk results for each segment reported in a balanced Risk Assessment Matrix.

High and Very High risks should always be considered as unacceptable and should therefore be reduced to at least medium risk, which, according to each company's criteria, can be considered as the tolerable risk level, following the ALARP (As Low As Reasonably Practicably) principle.

#### IV. CONCLUSIONS

The implementation of the risk triad algorithm has been carried out to calculate the probability of failure due to the threat of external corrosion in pipelines. The variables considered in a previous indexing model were taken as a starting point, but with a novel approach.

The algorithm allows performing a probabilistic analysis, offering less uncertainty in the results. The use of OR and AND logic gates allow considering the interdependence or independence of the variables among them, which helps to avoid masking their contributions.

The algorithm allows the Company to determine the PoF for different combinations of exposure, mitigation and resistance scenarios, contributing to timely and informed decision making.

#### REFERENCES

- [1] Department of Transportation, U.S. Government Printing Office, *49 Code of Federal Regulations Part 195*, Washington DC, 2011.
- [2] *Oil & Gas Pipeline Systems*, CSA Z662, 2019.
- [3] *Risk Based Inspection Methodology*, API Recommended Practice 581, 2020.
- [4] *Gestión de integridad de sistemas de tubería para transporte de líquidos peligrosos*, Norma Técnica Colombiana NTC 5901, 2012.
- [5] *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*, API Recommended Practice 1160, 2019.
- [6] *Managing System Integrity of Gas Pipelines*, ASME B31.8S, 2018.
- [7] W. K. Muhlbauer, *Pipeline risk assessment: The Definitive Approach and Its Role in Risk Management*. Houston: Clarion Technical Publishers, 2015.
- [8] E. Hendren, S. Gosse, K. Muhlbauer, *L3 - Quantitative Risk Reference Model For Pipelines*, Littleton: American Innovation, 2008.
- [9] W. K. Muhlbauer, D. Johnson, E. Hendren, S. Gosse, "A L3 Gas Reference Modelation of Pipeline Risk Algorithms IPC06-10178," in *Proceedings of International Pipeline Conference*, 25-29 September 2006, Calgary, Alberta, Canada.
- [10] W. K. Muhlbauer. *Pipeline risk management manual: ideas, techniques, and resources, third edition*. Burlington, MA, USA: Elsevier, 2004.
- [11] B. Illowsky, S. Dean, *Introductory Statistics*. OpenStax - Rice University, 2018.
- [12] D. Calar, K. Goebel, P. Sandborn, U. Kumar. *Prognostics and Remaining Useful Life (RUL) Estimation: Predicting with Confidence*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2021.
- [13] C. M. Tan, T. N. Goh – Editors, *Theory and Practice of Quality and Reliability Engineering in Asia Industry*, Springer Nature, 2017.
- [14] European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas Pipeline Incidents," in 11<sup>th</sup> EGIG-report 1970-2019, Doc. number VA 20.0432, 2021.
- [15] Environmental Science for European Refining, "Performance of European cross-country oil pipelines, Statistical summary of reported spillages in 2019 and since 1971," Report No. 4/21, CONCAWE, Brussels, 2021.

- [16] National Association of Corrosion Engineers, Robert Baboian, R. S. Treseder, *NACE Corrosion Engineer`s Reference Book. Third Edition*, Houston: NACE International, 2002.
- [17] *Methods of test for soils for civil engineering purposes Part 3: Chemical and electro-chemical test*, BS 1377-3, 2018.
- [18] R. L. Starkey, K. M. Wight, "Anaerobic Corrosion of Iron in Soil," *Soil Science*, vol. 62, no. 4, pp. 341, Oct. 1946.
- [19] H. M. Herro, "MIC Myths - Does Pitting Cause MIC," presented at the CORROSION 98, San Diego, California, Mar. 1998.
- [20] J. Álvarez, E. Ruggiero, A. Rodríguez, "Definición de un criterio para la priorización de indicaciones CIPS-DCVG en el marco de la implementación de un proceso ECDA," presentado en el 2º Congreso de Integridad en instalaciones en el Upstream y Downstream de Petróleo y Gas, Perú, 2014.

## Aplicación web para práctica con vectores y soporte educativo bajo el modelo de Educación Basada en Web

Web application for practice with vectors and educational support under the Web-Based Education model

Rubén Peredo-Valderrama<sup>1</sup>, Iván Peredo-Valderrama<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-8345-8433> | [rperedo@ipn.mx](mailto:rperedo@ipn.mx)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Querétaro, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-2484-9557> | [ivan.peredo@upq.edu.mx](mailto:ivan.peredo@upq.edu.mx)

Recibido 08-01-2022, aceptado 10-03-2022

### Resumen

La propuesta presenta una aplicación web para práctica con vectores en el plano cartesiano  $xy$ , siendo una herramienta de apoyo en materias como: mecánica, cálculo vectorial, álgebra lineal, electromagnetismo, etc., constituyendo una herramienta avanzada donde los estudiantes practiquen sus saberes de una manera práctica, en conformidad con el modelo de Educación Basada en Web (Web Based Education, WBE por sus siglas en inglés). Los vectores son un concepto extensamente empleado en diferentes materias, pero este concepto es complejo, complicado de comprender, y ante la crisis sanitaria por COVID-19 que seguimos viviendo hasta el momento, ha expuesto la necesidad de herramientas de apoyo para educandos y educadores, con el objetivo de complementar sus clases diarias, con actividades prácticas para crear experiencias más enriquecedoras en las aulas. La propuesta presentada busca producir actividades prácticas multimedia con vectores, para ecuaciones, suma y resta de vectores; a través de la personalización de los vectores para multiplicación escalar configurando los coeficientes de la ecuación del vector, renderizando las características de los vectores como: ángulo, componentes del vector y magnitud. La propuesta presentada se ajusta con la designada Educación 4.0, apoyando proyectos y competencias con vectores, proveyendo experiencias prácticas más enriquecedoras, incorporando de manera innovadora la tecnología en el proceso enseñanza/aprendizaje con vectores. Las aportaciones de la propuesta en el Front-end se basa en el modelo de componentes con las siguientes ventajas: conquista de la complejidad, manejo del cambio, y maximiza la reutilización de las partes del proyecto. La utilización de patrones de software ha permitido mejorar la arquitectura de la propuesta mejorando: composición, escalabilidad, maximización de la reutilización y mantenibilidad. El CRUD de la propuesta ha posibilitado la elaboración de ejercicios multimedia interactivos, reconfigurables y dinámicos.

**Palabras clave:** vectores, aplicación web, Educación 4.0, Educación Basada en Web, multimedia.

### Abstract

The proposal presented a web application for practice with vectors in the Cartesian  $xy$  plane, being this a support tool in subjects such as: mechanics, vector calculus, linear algebra, electromagnetism, etc., constituting an advanced tool, where students practice their knowledge in a practical way, in accordance with the paradigm of Web Based Education (WBE). Vectors are a concept widely used in different subjects, but this concept is complex, complicated to understand, and in view of the COVID-19 health crisis we are still experiencing, it has exposed the need for support tools for students and educators, with the aim of complementing their daily classes with practical activities to create more enriching experiences in the classroom. The proposal presented seeks to create practical multimedia activities with vectors, for: equations, addition and subtraction of vectors; through the customization of vectors for scalar multiplication by configuring the coefficients of the vector equation, rendering the characteristics of the vectors such as: angle, vector components, and magnitude. The presented proposal fits with the designated Education 4.0, supporting projects and competences with vectors, providing more enriching practical experiences, incorporating in an innovative way the technology in the teaching/learning process with vectors. The contributions of the proposal in the Front-end are based on the component model with the following advantages: conquest of complexity, management of change, and maximizes the reuse of the parts of the project. The use of software patterns has allowed to improve the architecture of the proposal by improving: composition, scalability, maximization of reuse and maintainability. The CRUD of the proposal has enabled the development of interactive, reconfigurable and dynamic multimedia exercises.

**Index terms:** Vectors, Web Application, Education 4.0, Web Based Education, Multimedia.

## I. INTRODUCCIÓN

Internet ha posibilitado la compartición de recursos e información de formas anteriormente impensables, transformando nuestras vidas de manera inexorable, afectando innumerables áreas del conocimiento. Los usuarios conectados a internet pueden acceder a múltiples tipos de servicios e información, para llevar a cabo de una mejor manera sus actividades cotidianas. El surgimiento de la web fue un punto de inflexión en la historia de internet que, en conjunto con el primer navegador web totalmente con una Interfaz de Usuario Gráfica (Graphical User Interface, GUI por sus siglas en inglés), revolucionó la sociedad, al posibilitar el acceso a información de todo tipo a usuarios con conocimientos básicos en computación, ya que anteriormente se requerían de conocimientos computacionales más avanzados. El acceso a la información ha transformado todo tipo de actividades como: compras, entretenimiento, educación, comunicación, etc. El binomio de internet y web es utilizado por todo tipo de personas con diferentes tipos de formación, llevando cada uno a cabo diferentes actividades en la red. Anteriormente, las instituciones educativas contemplaban al binomio de la Internet y la Web como una simple curiosidad, pero esta percepción ha ido cambiando a lo largo de los años, creciendo año tras año la presencia de las instituciones educativas en internet y web, y ahora más debido a la pandemia por COVID-19 que seguimos viviendo. Muchas instituciones educativas ya tienen sus materiales educativos y evaluaciones en línea actualmente, no obstante, son pocas las que cuentan con herramientas complementarias que hagan más enriquecedoras las experiencias de los estudiantes. La web ha posibilitado a las diferentes instituciones educativas publicar sus materiales educativos en línea, para tenerlos accesibles desde cualquier parte y a cualquier hora, permitiendo que los educandos puedan avanzar a su propio ritmo. La educación no está excluida de la revolución que ha traído el binomio de internet y web, instaurando nuevos modelos educativos, cambiando la educación tradicional, y debido a la pandemia se ha vuelto un tema fundamental para diferentes instituciones educativas.

La Educación Basada en Web (Web Based Education, WBE por sus siglas en inglés), se ha vuelto un área fundamental de la educación a distancia, debido a que gran parte de los desarrollos actuales se implementan bajo este modelo. La WBE se identifica por: separación entre educandos, educadores e incluso personal de apoyo, en una organización educativa, el uso de tecnologías Web para la distribución y presentación de los contenidos educativos, un canal de comunicación entre educandos, educadores y el personal de apoyo en el proceso de enseñanza/aprendizaje. Los contenidos educativos cada vez son más complejos, en gran medida a que se busca aprovechar el canal de comunicación bidireccional para mejorar interactividad, distribución, y almacenamiento económico de los contenidos educativos, además de ser posible entrelazar contenidos educativos con otros recursos educativos complementarios de la institución o de otras instituciones externas [1].

Hay múltiples definiciones del concepto competencia, donde una definición simple es la siguiente: “saber de ejecución”; relacionando: saber pensar, saber desempeñar, saber interpretar; con un saber actuar en variados escenarios. Por su parte la competencia es entendida como la capacidad de movilizar variados recursos cognitivos para enfrentar a diferentes situaciones a través de la práctica. El Aprendizaje Basado en Competencias (Competency Based Learning, CBL por sus siglas en inglés), busca el desarrollo del aprendizaje integral del educando, implicando el uso que hacen los educandos del conocimiento en escenarios de la vida personal, social y profesional, en entornos y ámbitos de la vida real. Teniendo como objetivo que los educandos activen su saber, emplazándolo para poner en práctica lo aprendido, yendo más lejos del típico salón de clases, contextualizándolos y trasladándolos a variadas situaciones a lo largo de su vida. El CBL se apoya en variados recursos tecnológicos, con el objetivo de que educandos y educadores intercambien experiencias, solucionen problemas, o lleven a cabo proyectos, donde el educando utilice su saber para llevar a la práctica lo aprendido. Siendo un objetivo fundamental del CBL que el educando active sus saberes poniéndolos en práctica [2]. Lo cual es un punto principal de la propuesta presente, al proveer una herramienta de apoyo llevada a cabo por medio de una aplicación web, donde lleve a cabo proyectos con vectores, posibilitando practicar a los educandos sus saberes por medio de prácticas multimedia interactivas.

La Educación 4.0 asume una visión de apoyo en el proceso de enseñanza/aprendizaje a través de las tecnologías, liberándola de los tiempos, lugares y contenidos; para la conformación de múltiples modelos educativos. De la misma forma que el CBL, la Educación 4.0 fomenta ambientes de aprendizaje innovadores, con metodologías como el Aprendizaje Basado en Proyectos (Project Based Learning, PBL por sus siglas en inglés), y las competencias apoyadas en experiencias prácticas, que promuevan los saberes del educando con lo aprendido al ponerlos en práctica, constituyendo experiencias más enriquecedoras para los educandos y los educadores. La Educación 4.0 busca impulsar el uso de la Inteligencia Artificial (Artificial Intelligent, AI por



sus siglas en inglés), en ambientes de aprendizaje innovadores a través de la tecnología [3]. La inquietud por mejorar la educación científica/tecnológica tiene una importancia a nivel mundial, debido al valor que se le suele atribuir. Se suelen llevar a cabo diferentes estrategias y planes para resolver esta inquietud. Esto debido a que la educación científica/tecnológica es un aspecto estratégico para muchos países. Para poder mejorar hay que medir, por lo tanto, debemos medir lo que los educandos aprenden, lo cual parece una tarea sencilla, pero es más compleja de lo que parece, y con esta exigencia nace la necesidad de revisión de planes de estudio y de modos de enseñar.

Entrando en materia, una definición de vector simple es la siguiente: “un segmento de recta que está orientado o dirigido en el espacio”. Las partes constituyentes de un vector son las siguientes: origen, extremo, magnitud o módulo, sentido y dirección. Siendo el origen el punto de origen de donde sale el vector, el extremo es el segundo punto donde termina el vector, la magnitud o módulo es la extensión del vector, el sentido se muestra por una flecha en el segundo punto donde termina el vector, finalmente la dirección se fija por la orientación en el espacio del vector. Las magnitudes físicas pueden ser escalares o vectoriales, donde las escalares son las cuales solo se muestra la magnitud, y no contienen información adicional extra. Mientras que las magnitudes vectoriales son las que además de la magnitud, se provee: sentido, dirección y punto de aplicación. Numerosos conceptos físicos pueden ser representados por medio de vectores como: aceleración, desplazamiento de un cuerpo en movimiento, fuerza, velocidad, momento, etc.; todas estas son magnitudes vectoriales. Los temas sobre vectores deben de tomar en cuenta el sistema referencial de los vectores, constituido por un punto de origen 0 y ejes perpendiculares, a este sistema de referencia se le designa como sistema de coordenadas ortogonales, donde cualquier vector puede ser contenido dentro de este marco de referencia, los cuales pueden ser: plano cartesiano  $xy$  o  $xyz$ , u algún otro marco de referencia [4]. La presente propuesta solo utilizará el plano cartesiano  $xy$  para delimitarlo.

Los vectores como se explicó anteriormente tienen una gran importancia, ya que a través de ellos podemos estudiar fenómenos de la naturaleza, debido a que los vectores nos posibilitan representar estos fenómenos. Los vectores como anteriormente mencionamos son utilizados en diferentes materias como: mecánica, cálculo vectorial, álgebra lineal, electromagnetismo, etc. El tópico de los vectores es extensamente empleado de forma independiente, o como parte de otras materias como: física, matemáticas, ciencia, ingeniería, entre otras. En el caso particular del Instituto Politécnico Nacional (IPN), hay una gran variedad de cursos con vectores a nivel medio superior de los diferentes Centros de Estudios Científicos y Tecnológicos (CECyT), y en múltiples unidades profesionales a nivel Licenciatura.

Hay una gran cantidad de herramientas de apoyo para la enseñanza de los vectores en la educación, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) cuenta con la propuesta: Suma vectorial – Objetos [5]. La Fundación Carlos Slim tiene un sitio web denominado [aprende.org](http://aprende.org), con cursos para: capacitación, certificación, diplomados, etc., el tópico de vectores se maneja dentro de la materia de matemáticas en el despeje de fórmulas físicas con magnitudes escalares [6]. La academia Khan cuenta con diferentes cursos constituidos principalmente por videos para la enseñanza de los vectores, estos cursos cuentan con evaluaciones compuestas por cuestionarios simples, la parte práctica para los educandos están constituidas con contenidos fijos y una pregunta evaluable, también los educandos cuentan con un tablero de aprendizaje personalizable [7]. Las tres propuestas mencionadas previamente poseen en común una interactividad muy restringida, los nuevos ejercicios son estáticos, y no se pueden guardar, asimismo las propuestas cuentan con un soporte de multimedios restringida. Hay otras propuestas de apoyo para la enseñanza de los vectores más adelantadas, una de estas propuestas se denominada Geogebra, está disponible para varias plataformas, además de contar con una aplicación Web, la cual tiene varios cursos sobre vectores como: vectores en el plano, suma, resta, etc., donde los educadores pueden desarrollar contenidos educativos para varios niveles educativos, los contenidos pueden contar con evaluaciones, la propuesta cuenta con una interacción dinámica mejorada respecto a propuestas anteriormente citadas, el apoyo para multimedios todavía es restringido, y no tiene manera de organizar los contenidos educativos creados [8]. La propuesta PhET de la Universidad de Colorado Boulder es una institución sin fines de lucro, la iniciativa busca una forma de enseñar y aprender la ciencia de manera innovadora, a través de simulaciones interactivas gratuitas, con simuladores educativos abiertos disponibles bajo la licencia de Atribución Comunes Creativa (Creative Commons Attribution, CC-BY por sus siglas en inglés), siendo CC-BY la licencia más abierta, la cual posibilita a los usuarios: redistribuir, producir proyectos derivados, traducción, y la publicación de actividades comerciales con los créditos apropiados. PhET cuenta con un par de simuladores sobre el tópico de los vectores los cuales son: Suma de vectores, y Suma de Vectores: Ecuaciones; esta última propuesta es la más interesante de todas las herramientas previamente mencionadas, a pesar de esto tiene sus desventajas, debido a que no se pueden producir nuevos ejercicios personalizados y guardarlos, además de no contar con soporte para multimedios [9], [10], [11].

La presente propuesta muestra el desarrollo de una aplicación web especializada para la práctica de vectores en el plano cartesiano  $xy$  de apoyo bajo el modelo de WBE. La presente propuesta tiene como objetivo ser una herramienta de apoyo asistencial, que aproveche mejor las ventajas que ofrecen internet y la web en la educación. La propuesta utiliza patrones de diseño de software, los cuales son en términos generales buenas prácticas de programación, encapsulando el conocimiento recolectado de expertos, que nos permitió manejar mejor el cambio en la presente propuesta, facilitando los cambios y mantenimiento. La presente propuesta empleó la librería React escrita en el lenguaje de programación JavaScript del lado del Front-end, esta librería nos permitió desarrollar la Interfaz de Usuario (User Interface, UI por sus siglas en inglés), con las ventajas que a continuación enumeraremos: modelo basado en componentes, código cien por ciento JavaScript, DOM virtual, y ECMAScript 6. El modelo basado en componentes permitió la reutilización de los componentes del proyecto, al ser escrito en código cien por ciento JavaScript es soportado por la mayoría de los navegadores Web actuales, el DOM virtual permitió renderizar solamente las partes de los componentes a actualizar, y por último la utilización de ECMAScript 6 mejoró la legibilidad y versatilidad para el desarrollo de la presente propuesta, el código ECMAScript 6 final de la propuesta se transformó a ECMAScript 5 por cuestiones de compatibilidad con los navegadores web actuales, por medio de Webpack y Babel, donde Webpack es un empaquetador de módulos de JavaScript de código abierto, está enfocado principalmente para JavaScript, pero puede soportar otros recursos como: imágenes, lenguaje de marcado de hipertexto (HyperText Markup Language, HTML por sus siglas en inglés), y hojas de estilo en cascada (Cascading Style Sheets, CSS por sus siglas en inglés), conformando módulos con dependencias y creando activos estáticos. Babel por su parte es un transpiler que nos permitió transformar el código de la versión ECMAScript 6 a ECMAScript 5, debido a cuestiones de compatibilidad, ya que ECMAScript 5 es soportado prácticamente en su totalidad en los navegadores web actuales. React.js cuenta con una licencia del tipo Instituto de Tecnología de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT por sus siglas en inglés), libre y permisiva, con pocas limitaciones para reutilización [12]. La presente propuesta tuvo como uno de sus objetivos fundamentales reducir la elevada complejidad tecnológica asociada para la experimentación con vectores, para producir experiencias más enriquecedoras para los educandos, donde los estudiantes puedan practicar sus saberes, por medio de una herramienta de apoyo multimedia.

## II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La Fig. 1 muestra la arquitectura del Front-end y Back-end de la propuesta, se utilizó el patrón de diseño de software denominado Modelo Vista Controlador (Model View Controller, MVC por sus siglas en inglés), siendo un patrón contenedor para toda la propuesta, ya que nos permite combinar varios patrones de diseño de software, la presente propuesta utilizó adicionalmente los siguientes patrones de diseño de software: composición, observador, singleton, y Objeto de Acceso a los Datos (Data Access Object, DAO por sus siglas en inglés). Solo el patrón composición se implementó en el Front-end de la propuesta, en conjunto con los componentes implementados con React.js, todos los restantes patrones de diseño de software siguientes: Observador, Singleton, y DAO; fueron implementados del lado del Back-end. La implementación del patrón de diseño de software MVC de la propuesta se llevó a cabo a través del framework Struts 2 [13], y se empleó para la implementación como servidor Web GlassFish Server 4.1.1 [14]. La base de datos se llevó a cabo por medio de MySQL 8 [15], la cual representa nuestro modelo en el patrón MVC, además de la lógica de negocios, lo anterior se muestra en la Fig. 1. Las vistas son las interfaces de la aplicación, con las que el usuario interactúa a través de la aplicación Web, estas están implementadas por medio de la librería React.js usando el modelo basado en componentes de software, en la Fig. 1 se muestra que la vista de la aplicación Web está compuesta por los componentes: Aplicación, Login, LeerPregunta, MenúPrincipal, y Modificar. El controlador en nuestra propuesta se denomina FilterDispatcher, teniendo como función principal seleccionar la correspondiente vista de salida a renderizar en respuesta a la correspondiente entrada del usuario, aparte de ejecutar la correspondiente lógica de negocios asociada. El patrón de composición nos proveyó una solución robusta para la construcción de sistemas complejos con base en componentes más pequeños. Teniendo básicamente dos tipos de componentes: simples y compuestos, estos últimos representan colecciones de componentes. El patrón de composición nos permitió representar nuestro Front-end como una jerarquía de árbol, donde las estructuras constituyen la jerarquía de árbol, donde los componentes de esta estructura pueden ser simples o compuestos. La Fig. 2 muestra el diagrama de componentes de la propuesta del Front-end, implementados con React.js [12], la propuesta también utiliza componentes preconstruidos de la iniciativa Material-UI, siendo esta una librería React.js muy popular para crear UI, basadas en componentes React.js personalizables, la librería es de código abierto, asimismo permite incorporar otras soluciones de terceros [16];

LO



La persistencia se llevó a cabo con base en el framework Hibernate [18], que nos permitió llevar a cabo el Mapeado Objeto Relacional (Object-Relational Mapping, ORM por sus siglas en inglés), este framework nos permitió establecer un puente entre el modelo de Programación Orientado a Objetos (Object Oriented Programming, OOP por sus siglas en inglés), y el modelo relacional, dos modelos incompatibles entre sí, relacionando las estructuras del modelo relacional con sus correspondientes estructuras lógicas en el modelo OOP. La aplicación web implementó las estructuras de la base de datos acopladas por medio de entidades lógicas, para llevar a cabo las siguientes acciones de la propuesta: Crear, Leer, Actualizar y Borrar (Create, Read, Update and Delete, CRUD por sus siglas en inglés), a través de la conjunción de: Hibernate, ORM, DAO y MVC. El patrón DAO nos permitió separar la lógica de negocios de la lógica para acceder a los datos, delegando a DAO el acceso a los datos del modelo.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 3 muestra la vista para crear un nuevo ejercicio para la práctica de vectores en el plano cartesiano, proveyéndole los componentes rectangulares de los vectores, en nuestro caso de los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$ , siendo estos los siguientes valores respectivamente:  $A_x=55$ ,  $A_y=90$ ,  $B_x=99$ , y  $B_y=30$ , representados estos a continuación en su forma matricial correspondiente:  $\vec{A}=[A_x, A_y]$  y  $\vec{B}=[B_x, B_y]$ , sustituyendo los componentes rectangulares correspondientes a continuación:  $\vec{A}=[55, 90]$  y  $\vec{B}=[99, 30]$ , la visualización de manera dinámica y gráfica de los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$  se pueden ver en su forma final en la Fig. 3. En la Fig. 3 también se muestra el botón **Seleccionar archivo** para la subida de multimedios asociado al ejercicio, mostrado en la esquina inferior izquierda, en este caso concreto el archivo multimedia asociado es un video en formato MP4 denominado: vectores3.mp4, en caso de estar seguro de los datos anteriormente proporcionados, se presiona el botón **Enviar** creándose el ejercicio, y en caso de que no se desee crear el ejercicio se presiona el botón **Cerrar**. En la Fig. 4 se pueden ver el ejercicio creado exitosamente en la aplicación Web, mostrando los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$  con sus componentes rectangulares de los vectores respectivos, además de mostrar el cálculo automático por parte del sistema de los ángulos de los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$ , siendo estos respectivamente los siguientes: 58.57, y 16.85.

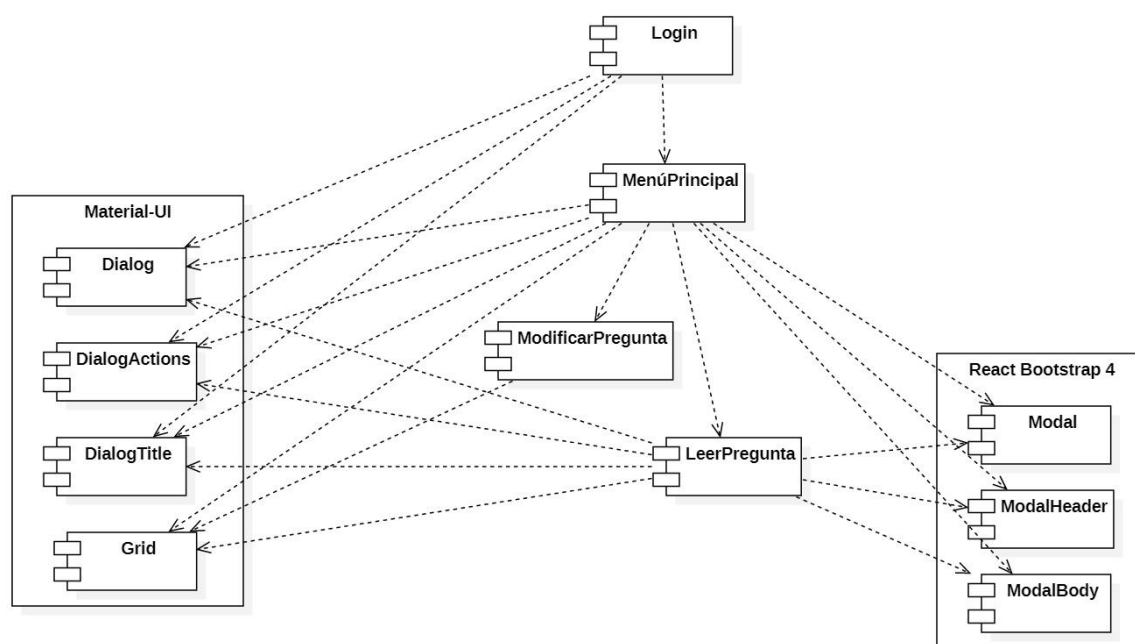


Fig. 2. Diagrama de componentes de la vista de la propuesta.

7

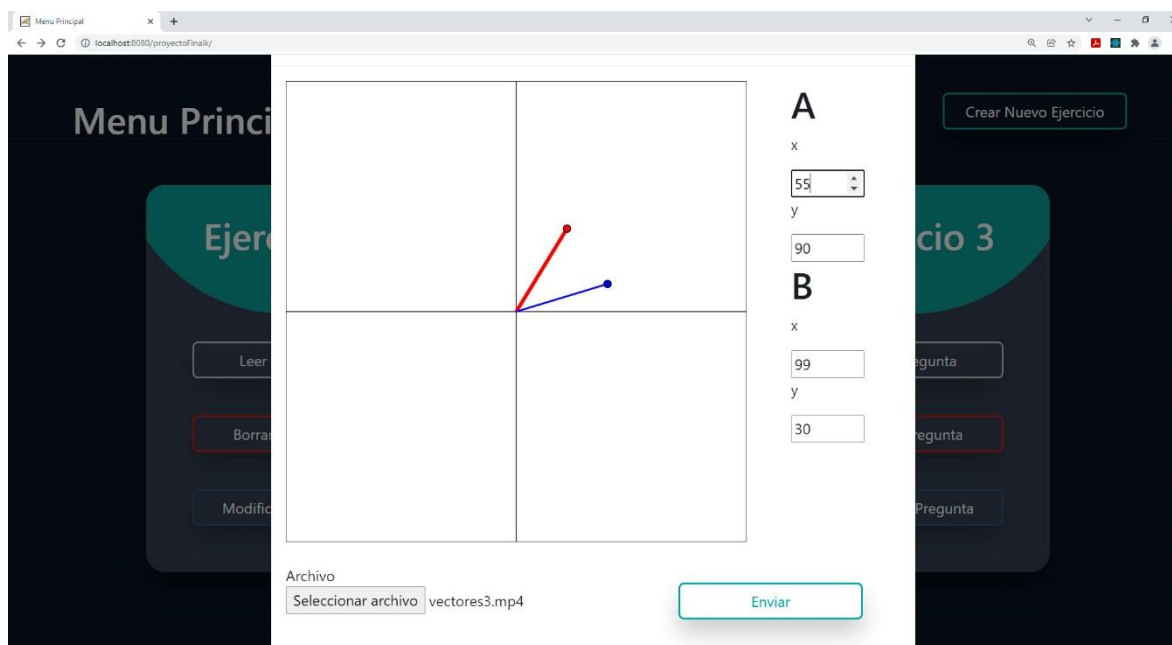


Fig. 3. Interfaz para la creación de nuevos ejercicios de vectores en el plano cartesiano xy.

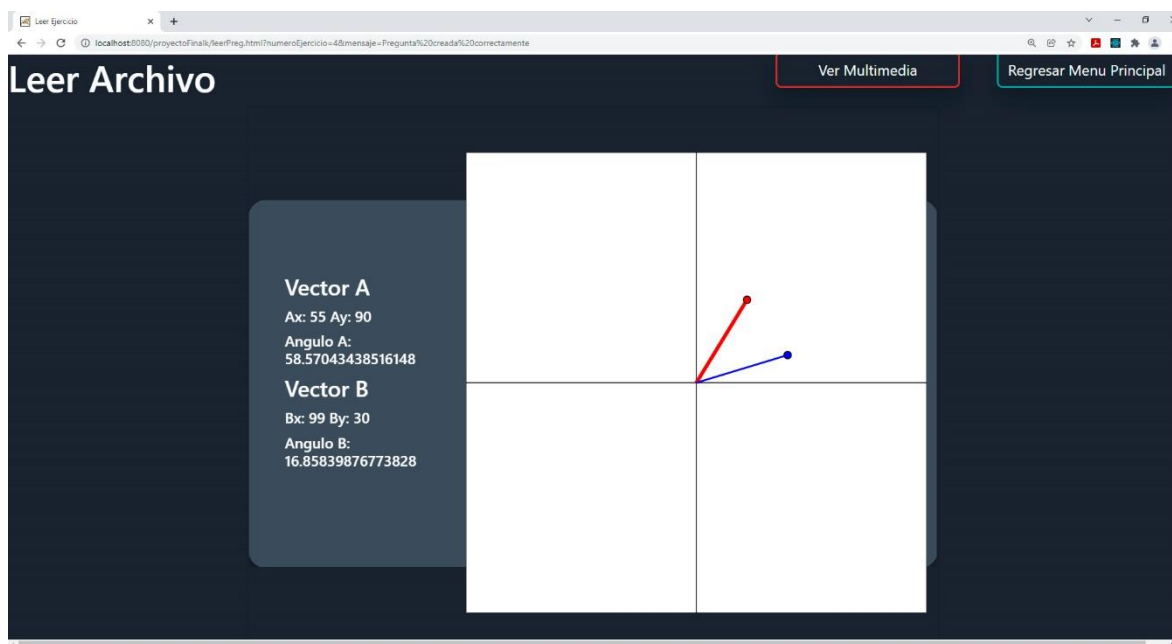


Fig. 4. Interfaz del ejercicio de vectores creado exitosamente en el plano cartesiano xy.

La Fig. 5 presenta dos nuevos vectores que muestra en segundo plano el vector original (esquina superior izquierda), luego se muestra en segundo plano la suma de los vectores (esquina superior derecha), la resta de los vectores se muestra también en segundo plano (parte inferior central), y finalmente en el centro se muestra el componente multimedia asociado al ejercicio para apoyo al educando, en este caso un archivo de sonido con

la explicación de la actividad. La aplicación Web llevara a cabo el cálculo automático para la suma de los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$ , y su representación gráfica, representada esta suma por el vector  $\vec{S}$ , mostrando a continuación los resultados en su forma matricial de los nuevos vectores:  $\vec{S}=[S_x, S_y]=[350, 500]$ , con un ángulo de: 55.00. Igualmente, para la resta de los vectores, se muestra el cálculo de la resta de los vectores  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$  por parte de la aplicación Web, y su representación gráfica, siendo representada esta resta por el vector  $\vec{R}$  mostrada a continuación, donde los resultados en su forma matricial de los nuevos vectores son los siguientes:  $\vec{R}=[R_x, R_y]=[-150, -300]$ , con un ángulo de: 63.43.

8

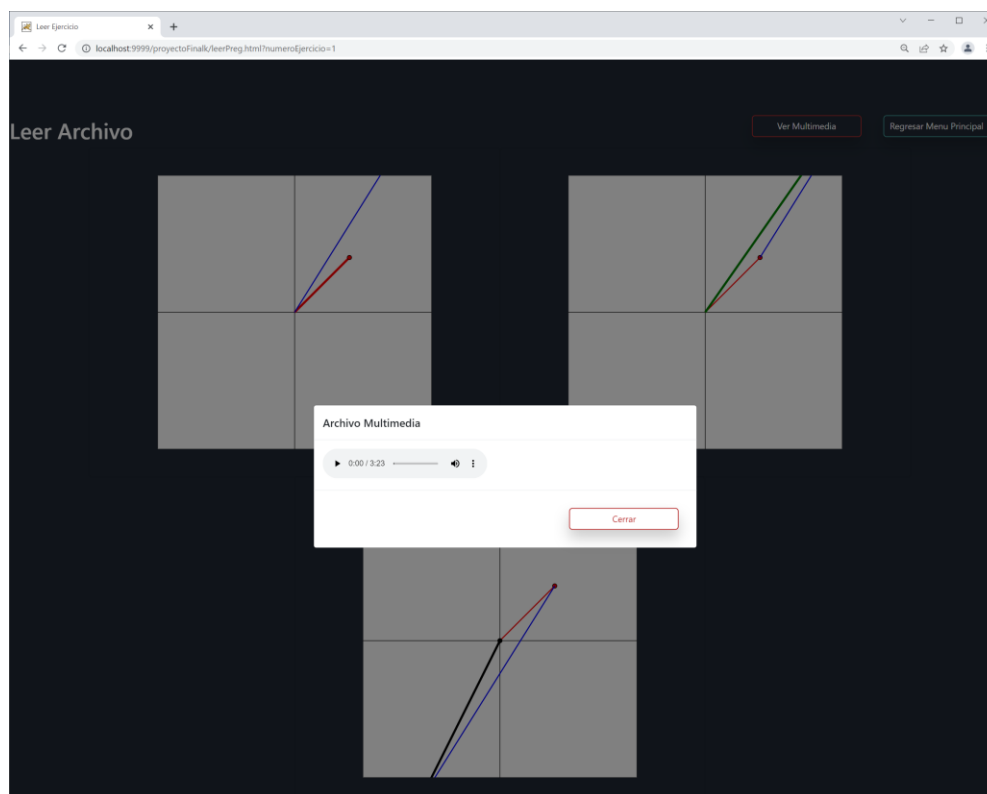


Fig. 5. Interfaz para la suma y resta de los vectores con multimedia en el plano cartesiano.

La Fig. 6 muestra la interfaz del menú principal con ejercicios de vectores creados en el plano cartesiano, mostrando en la parte superior los botones: **Salir** y **Crear Nuevo Ejercicio**. En la parte central se tienen dos ejercicios de vectores creados previamente, cada componente contiene las opciones: **Leer Pregunta**, **Borrar Pregunta**, y **Modificar Pregunta**; el botón de **Leer Pregunta** nos muestra el ejercicio correspondiente creado en el plano cartesiano dependiendo del botón seleccionado, mostrándonos el vector original, la suma y resta de los vectores, así como los cálculos automáticos de los ángulos correspondientes, de los vectores originales, suma y resta respectivamente; el botón **Borrar Pregunta** despliega un cuadro de diálogo preguntándonos si estamos seguros de borrar el ejercicio correspondiente, en caso de confirmar el borrado al darle clic al botón **Borrar Pregunta**, se borrará el ejercicio correspondiente; por último en caso de dar clic al botón **Modificar Pregunta** nos mostrara una interfaz similar a la de la Fig. 3 del respectivo ejercicio de vectores, con los componentes rectangulares llenados en el proceso de su creación, para el caso de modificar los valores al dar clic al botón **Modificar Pregunta**, se modifica el ejercicio proporcionando los nuevos componentes rectangulares, recalculando el vector original, la suma y la resta respectivamente del ejercicio. La aplicación web también cuenta con un módulo de Login para validar a los usuarios dentro del sistema como se muestra en la Fig. 7.



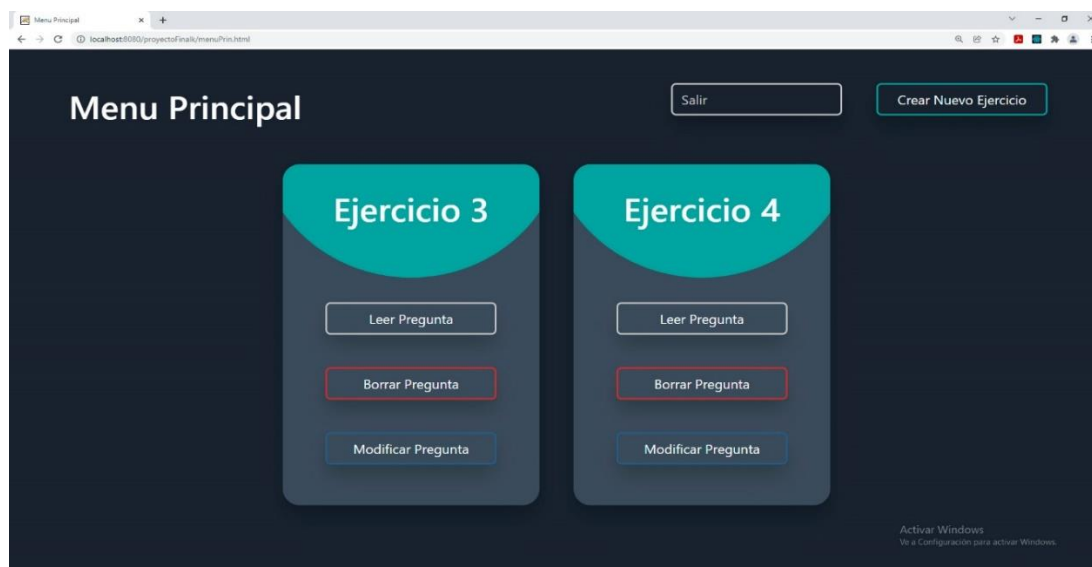


Fig. 6. Interfaz del menú principal con los ejercicios de vectores creados en el plano cartesiano.

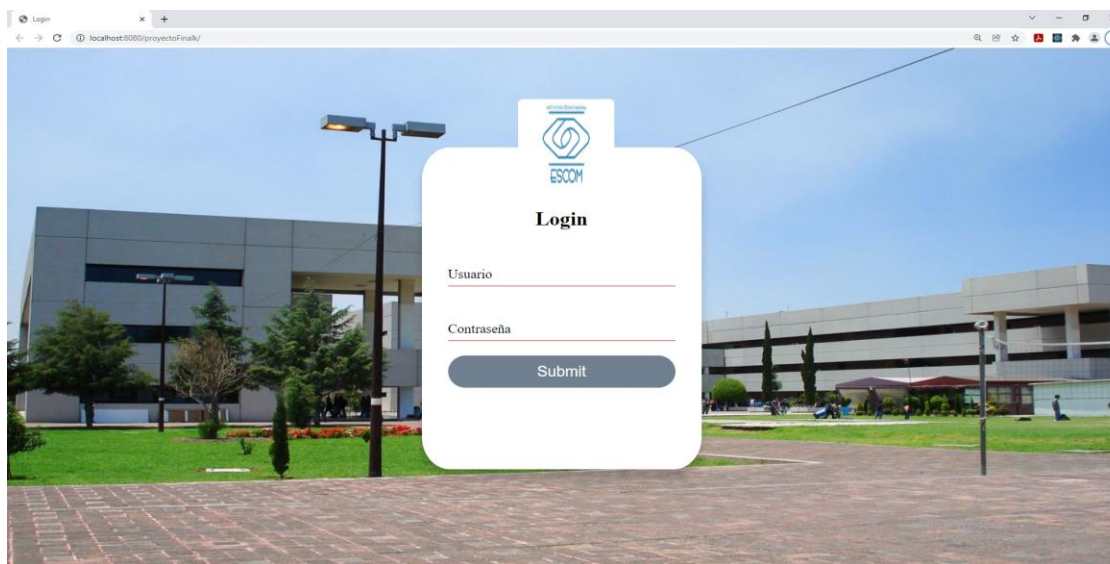


Fig. 7. Interfaz del Login de la aplicación Web para práctica de vectores en el plano cartesiano.

El valor agregado de la presente propuesta comparándola con las iniciativas del estado del arte de vectores de la UNAM, la Fundación Carlos Slim o la academia Khan, consiste en que se puede crear nuevos ejercicios multimedia interactivos, reconfigurables y dinámicos, mientras que las otras iniciativas anteriormente mencionadas son muy limitadas en estos aspectos. Mientras que en la iniciativa de GeoGebra tiene su mayor problema en que se basa en los Applets Java, los cuales ya están depreciados y la etiqueta HTML para el Applet también está depreciada, lo que puede ocasionar que muchos navegadores Web no soporten los contenidos educativos desarrollados en esta plataforma, mientras que nuestra propuesta se apegue a los estándares de la Web, siendo soportados en los navegadores más actuales. Finalmente, la iniciativa Phet de la Universidad de Colorado Boulder tiene su mayor debilidad en la creación de materiales educativos basados en vectores y su guardado como ejercicios en la plataforma, además de

carecer de soporte multimedia, mientras que la propuesta permite la creación y modificación de los materiales educativos por medio del CRUD, y tiene soporte de archivos multimedia.

La presente propuesta puede utilizarse en varias materias, utilizaremos para ejemplificar la materia de física, la cual es considerada en diferentes planes de estudios, en diferentes niveles educativos, abarcando en muchos casos el tema de los vectores, con temas que pueden ser apoyados por la herramienta de la presente propuesta para temas como: propiedades de los vectores, producto punto, sistemas equivalentes de fuerzas, suma y resta de vectores, entre otros.

#### IV. CONCLUSIONES

La presente propuesta muestra una aplicación web para la práctica con vectores con soporte educativo todo bajo el modelo WBE, combinando internamente tres modelos, en el Front-end utilizamos el modelo de componentes de software, en el Back-end utilizamos el modelo OOP y el relacional. La presente propuesta cuenta con un CRUD que permite crear ejercicios prácticos multimedia interactivos, reconfigurables y dinámicos con vectores en el plano cartesiano  $xy$ , con las ventajas inherentes de los componentes de software, reduciendo la complejidad de desarrollo de los ejercicios para el profesor, al simplificar la elaboración de este tipo de materiales educativos, en prácticas con vectores en el plano cartesiano  $xy$ . El manejo del cambio en la propuesta se ve reflejado desde el ensamblado dinámico de componentes en diferentes tipos de contenidos con base en componentes simples y complejos bajo el patrón composición. La reutilización de las partes del proyecto ha mejorado, sobresaliendo el Front-end de la propuesta en conjunto con el patrón composición de diseño de software y la librería React.js, ya que las UI de la propuesta se implementaron con la librería React.js, construyendo las UI del usuario con base en componentes simples, para conformar componentes más complejos, es importante destacar que se hizo uso de componentes preconstruidos de las librerías: Material-UI, y React Bootstrap 4.

La propuesta hizo uso de la base de datos MySQL para la implementación del modelo, al incorporar el ORM en la propuesta, se tendió un puente entre los modelos incompatibles entre sí, el modelo relacional y la OOP, permitiéndonos relacionar las tablas del modelo relacional, con las estructuras lógicas en el modelo OOP, resultando en la escritura de la lógica de negocios en un modelo escrito en el modelo OOP, mejorando la mantenibilidad del código de la propuesta. Los patrones DAO y MVC mejoraron la escalabilidad de la propuesta, facilitando la migración de una base de datos a otra con mejores prestaciones en caso de ser necesario. Los ejercicios resultantes de la propuesta son dinámicos, interactivos, multimedia, y actualizables; lo que ha permitido a los educandos prácticas más interactivas donde puedan poner a prueba sus saberes, permitiendo que tanto educadores como educandos puedan modificar los ejercicios propuestos por los profesores, con la finalidad de tener prácticas más enriquecedoras entre educadores y educandos, proporcionando mejores retroalimentaciones, en este caso con el objetivo de mejorar la comprensión de los conceptos de vectores, suma y resta de vectores para los educandos con base a la práctica poniendo a prueba sus saberes. Los ejercicios pueden ser transformados en evaluaciones supervisadas por el profesor, mejorando la retroalimentación entre educadores y educandos. La presente propuesta al ser una aplicación web ha tomado mucha relevancia ante la pandemia de COVID-19 que hasta el día de hoy seguimos viviendo, permitiendo a los educandos poner a prueba sus saberes, con ejercicios prácticos en línea con retroalimentaciones. Las prácticas creadas por los educadores pueden agregar elementos multimedia de apoyo, gracias al módulo de subida de archivos dinámico, permitiendo agregar materiales complementarios de apoyo para los educandos. La presente propuesta utiliza librerías libres con la finalidad de reducir los costos por licenciamiento al máximo, para tener en un momento dado una versión de producción de bajo costo. La propuesta posibilita además agregar nuevas opciones pedagógicas en caso de ser requeridas, teniendo la posibilidad de adaptarlas a las necesidades de los educadores, y no que el educador se adapte a la herramienta.

Destacamos que la propuesta es innovadora en línea con la Educación 4.0, la cual tiene un enfoque basado en proyectos y competencias. La presente propuesta es en este momento un prototipo, pero gracias a los patrones de diseño de software implementados es posible la actualización del proyecto de software en un momento dado a una versión de producción. El importante mencionar que el patrón DAO ha posibilitado un acceso controlado y uniforme a los datos. Finalmente, respecto al trabajo futuro consideramos que hay que mencionar que se puede mejorar en los siguientes puntos: agregar más patrones de diseño de software, mejorar el soporte de arrastrar y soltar de las UI, incluir un módulo de Inteligencia Artificial, hacer análisis de datos de los resultados de los estudiantes con Python y pandas, y crear un módulo de análisis de datos para que automatice la obtención



de información en el momento, con la finalidad de que el educador pueda tomar mejores decisiones, en la retroalimentación hacia sus educandos, mejorar las UI, y documentar nuevas librerías que puedan incorporarse a la propuesta, mejorar la reconfiguración dinámica de los contenidos educativos en función de sus progresos en el curso, adaptación del nivel de los materiales educativos al educando, etc.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen a la Universidad Politécnica de Querétaro, al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y a la Escuela Superior de Cómputo (ESCOM) por su apoyo para este trabajo dentro del proyecto SIP: 20210896. Los autores desean reconocer a todos sus colegas y a los estudiantes en general que participaron en el diseño y desarrollo del software, y materiales de aprendizaje descritos en este artículo, y en particular a los estudiantes: Chávez Ávila Osvaldo Antonio, Fabela Galván Aarón Jhair, Jaime Villanueva Héctor Israel, y Olivares López Gerson Uriel.

#### REFERENCIAS

- [1] V. Devedzic, *Semantic Web and Education*, 1a ed., Boston, USA: Springer, 2006.
- [2] M.Á. López, *Aprendizaje, competencias y TIC*, 2a ed. CDMX, México: Pearson, 2017.
- [3] J. Toro, “Con visión de futuro”, *Conversus*, no. 137, pp. 5-7, Mar. 2019, url: [https://drive.google.com/file/d/1bHNWyuUiHB3bJdx4\\_hzW3dVUJFqMvPn/view](https://drive.google.com/file/d/1bHNWyuUiHB3bJdx4_hzW3dVUJFqMvPn/view)
- [4] V.A. Mendoza, A.E. García, D. Reich, *Física*, 1 ed., CDMX, México: Patria, 2017.
- [5] UNAM. “Suma vectorial.” [objetos.unam.mx](http://objetos.unam.mx/fisica/sumaVectorial/index.html). <http://objetos.unam.mx/fisica/sumaVectorial/index.html> (accessed Jan. 14, 2021).
- [6] Fundación Carlos Slim. “Despejes de fórmulas de física.” [aprende.org](https://aprende.org/pages.php?r=.portada_course_view&programID=matematicas&courseID=1777&load=5154). [https://aprende.org/pages.php?r=.portada\\_course\\_view&programID=matematicas&courseID=1777&load=5154](https://aprende.org/pages.php?r=.portada_course_view&programID=matematicas&courseID=1777&load=5154) (accessed Jan. 14, 2021).
- [7] Khan Academy. “Khan Academy.” [es.khanacademy.org](https://es.khanacademy.org). [https://es.khanacademy.org/search?referer=%2F&page\\_search\\_query=vector](https://es.khanacademy.org/search?referer=%2F&page_search_query=vector) (accessed Jan. 14, 2021).
- [8] BYJU'S. “GeoGebra | Aplicaciones matemáticas gratuitas - Usado por más de 100 millones de estudiantes y profesores de todo el mundo.” [www.geogebra.org](http://www.geogebra.org). <https://www.geogebra.org/?lang=en> (accessed Jan. 14, 2021).
- [9] University of Colorado Boulder. “PhET: Simulaciones gratuitas en línea de física, química, biología, ciencias de la tierra y matemáticas.” [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu). <https://phet.colorado.edu/es/> (accessed Jan. 14, 2021).
- [10] University of Colorado Boulder. “Vector Addition - Vectors | Vector Components | Equations - PhET Interactive Simulations.” [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu). <https://phet.colorado.edu/en/simulation/vector-addition> (accessed Jan. 14, 2021).
- [11] Facebook y la comunidad de software libre. “React – A JavaScript library for building user interfaces.” [reactjs.org](https://reactjs.org/). <https://reactjs.org/> (accessed Jun. 14, 2021).
- [12] Apache Software Foundation. “Welcome to the Apache Struts project.” [struts.apache.org](http://struts.apache.org). <https://struts.apache.org/> (accessed Sep. 9, 2009).
- [13] Oracle Corporation. “GlassFish.” [javaee.github.io](https://javaee.github.io/glassfish/). <https://javaee.github.io/glassfish/> (accessed Jun. 21, 2020).
- [14] Oracle Corporation. “MySQL.” [www.mysql.com](http://www.mysql.com). <https://www.mysql.com/> (accessed Sep. 21, 2021).
- [15] MUI. “MUI: The React component library you always wanted.” [material-ui.com](https://material-ui.com/). <https://material-ui.com/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [16] Facebook y la comunidad de software libre. “Storybook.” [reactstrap.github.io](https://reactstrap.github.io/). <https://reactstrap.github.io/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [17] Red Hat. “Hibernate. Everything data. – Hibernate.” [hibernate.org](http://hibernate.org/). <http://hibernate.org/> (accessed Sep. 9, 2019).

## Desarrollo de sitio web para IoT con Arduino

IoT website with Arduino

Gloria Mónica **Martínez Aguilar**<sup>1</sup>, Abel **Sosa Escobedo**<sup>2</sup>, Vanessa Maribel **Morales Ibarra**<sup>3</sup>

Universidad Tecnológica de Torreón, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3834-4880> | [gmartinez@utt.edu.mx](mailto:gmartinez@utt.edu.mx)

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-4236-326X> | [asosa@utt.edu.mx](mailto:asosa@utt.edu.mx)

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-3764-8858> | [vmorales@utt.edu.mx](mailto:vmorales@utt.edu.mx)

Recibido 08-01-2022, aceptado 30-01-2022

### Resumen

Internet de las cosas (IoT) es un arquetipo tecnológico que puede describirse como el conjunto de elementos que tienen pequeños sistemas integrados (sensores, microprocesadores, módulos de interconexión, actuadores, entre otros), que se comunican entre sí, para compartir información útil y mejorar los procesos. Por lo que el IoT industrial (IIoT) representa una oportunidad atractiva para aplicaciones de medición de nueva generación, que se basan cada vez más en eficientes y fiables sistemas de comunicación para permitir la amplia disponibilidad de datos permitiendo un análisis en tiempo real. Una de las cosas a tomar en cuenta con estos sistemas es la interoperabilidad de los componentes que lo integran, se han desarrollado una gran diversidad de soluciones para esto. Este tipo de sistemas son una herramienta ampliamente utilizada para la Industria 4.0 y es un tema en auge en campos industriales en los últimos años. Por lo que es de vital importancia la descripción de metodologías para la implementación de estos sistemas con tecnología asequible y amigable la cual brinde interoperabilidad, repetibilidad, monitoreo y control en tiempo real. En este trabajo se presenta una metodología para la implementación de un sitio web con IoT utilizando la tarjeta Arduino, el cual se puede orientar a diferentes áreas de operabilidad.

**Palabras clave:** IoT, Apache, Arduino, sitio web.

### Abstract

The Internet of Things (IoT) is a technological archetype that can be described as the set of elements that have small integrated systems (sensors, microprocessors, interconnection modules, actuators, among others), which communicate with each other, to share useful information and improve processes. So Industrial IoT (IIoT) represents an attractive opportunity for next-generation measurement applications, which increasingly rely on efficient and reliable communication systems to enable the wide availability of data allowing real-time analysis. One of the things to take into account with these systems is the interoperability of the components that make it up. A wide variety of solutions have been developed for this. This type of system is a widely used tool for Industry 4.0 and is a booming topic in both industrial and non-industrial fields in recent years. Therefore, the description of methodologies for the implementation of these systems with affordable and friendly technology is vitally important, which provides interoperability, repeatability, monitoring and control in real time. In this work, a methodology for the implementation of a website with IoT using the Arduino board is presented, which can be oriented to different areas of operability.

**Index terms:** IoT, Apache, Arduino, website.

## I. INTRODUCCIÓN

Internet de las cosas (IoT) es un paradigma tecnológico que está ganando terreno, tanto en el campo de las telecomunicaciones como en el campo computacional [1]. Se describe como un término que agrupa diferentes elementos (maquinaria, vehículos, mercancías, electrodomésticos, ropa y “cosas” en general), que poseen pequeños sistemas embebidos conformados por sensores, microprocesadores, interfaces de conexión cableada/inalámbrica y actuadores, los cuales se comunican, entre sí y con diversas aplicaciones a través de internet. Además, tienen la posibilidad de crear servicios inteligentes y autónomos. Esto permite el auge de nuevas tendencias, basadas en el almacenamiento de datos a gran escala, el análisis de cantidades robustas de información y la incorporación de sistemas ciberfísicos en comunicaciones máquina-a-máquina (M2M) [2].

IoT nace del concepto de la industria 4.0 o IIoT, implicando una evolución de las máquinas hacia un contexto de interconexión mutua para formar una comunidad colaborativa, enfocada en mejorar la productividad, reducir costos y ofrecer servicios más eficientes [3], [4]. De acuerdo a la pirámide, la automatización [5] cierra la brecha entre los niveles donde se encuentran los dispositivos de campo con los niveles donde es vital la recolección de la información para tomar decisiones inteligentes [6], [7].

Por lo que es necesario el empleo de herramientas avanzadas de control y monitoreo, que ayuden al tratamiento sistemático de diversos datos para convertirlos en información útil. De esta forma, se pueden explicar incertidumbres y optimizar procesos industriales. Ante esta situación, para el tratamiento de los datos obtenidos, es necesario la implementación de sistemas embebidos de bajo costo, por lo que varios fabricantes están invirtiendo grandes recursos investigativos en su diseño y producción, basándose en hardware y software, tanto licenciado como *open source* [8].

Entre las propuestas más relevantes, se pueden encontrar Arduino y Raspberry Pi, los cuales son dispositivos que cuentan con interfaces programables y altamente compatibles con diferentes tipos de sensores (temperatura, detección de poluciones, ruido, intensidad lumínica, entre otras) [9]. Sin embargo, aunque el uso de sistemas embebidos de bajo costo ha facilitado el despliegue de tendencias IoT, la amplia diversidad de proyectos existentes ha provocado que la mayoría de las soluciones diseñadas trabajen de manera aislada. Esto dificulta su integración en una plataforma centralizada, conllevando a la existencia de inconsistencias o falta de continuidad en los registros enviados por cada sensor.

Es por esto que en el presente trabajo se presenta una metodología para la implementación de un sitio web con IoT utilizando la tarjeta Arduino, el cual se puede orientar a diferentes áreas de operabilidad. El artículo se divide de la siguiente manera: la sección *II Metodología* en la cual se abordan *grosso modo* las características de las tecnologías utilizadas en esta propuesta, así como el desarrollo del sistema, la sección *III Análisis de resultados* donde se muestra el funcionamiento del sistema de acuerdo a lo diseñado, la sección *IV Conclusiones* donde se remarcan los puntos clave de lo obtenido en la implementación del sistema y por último las referencias.

## II. METODOLOGÍA

### A. Diseño del sistema

El diseño del sistema propuesto (véase Fig. 1) se basa en la implementación de un sistema web que puede ser accesado desde cualquier punto que cuente con internet, este establece una conexión a una base de datos que es alimentada por los datos monitoreados mediante un Arduino Uno acoplada con un Shield Ethernet.



Fig. 1. Diagrama del diseño del sistema.

En el desarrollo del sistema se utilizaron tecnologías digitales open source front end y back end tanto para destacar la asequibilidad, así como fácil implementación del mismo.

Una de las partes primordiales para la conectividad del sistema fue el uso de XAMPP, la cual es una distribución de Apache que incluye diferentes softwares libres. Combina un servidor web Apache, lenguaje web dinámico y una base de datos que sirve para el almacenamiento de información para servicios web. En las versiones actuales de XAMPP la base de datos se ha sustituido por MariaDB. Su ventaja de uso, es evitar la descarga e instalación de cada componente por separado y para crear o editar sus ficheros de configuración manualmente, XAMPP sólo requiere una pequeña fracción del tiempo necesario para descargar y ejecutar. Puede encontrarse en versión completa o en una versión más ligera, y permite configurar los componentes necesarios del servidor web mediante una misma y sencilla interfaz web. XAMPP puede ser ejecutado en diferentes sistemas operativos, es software de distribución libre, segura, y no requiere pago de licencias.

Las páginas del sistema se programaron en Hypertext Preprocessor (PHP), que es un lenguaje de código abierto muy popular, especialmente adecuado para el desarrollo web y que puede ser incrustado en Hypertext Markup Language (HTML), que es un lenguaje de marcado que se utiliza para el desarrollo de páginas de Internet. PHP se utiliza fundamentalmente para realizar páginas web dinámicas y este lenguaje es procesado en servidores. Lo mejor de esto es que al ser instalado en el servidor, el usuario no puede modificarlo en su ordenador y gracias a esto se pueden hacer aplicaciones más seguras. Desde este punto se definió la seguridad del sistema.

En el front-end se usaron hojas de estilo en cascada (CSS), las cuales son un lenguaje de estilos utilizado para describir la presentación de documentos HTML que permiten describir cómo serán renderizados los elementos estructurados de una página web en la pantalla, dándoles la apariencia que se desee, como: colores, espacios entre elementos, tipos de letra, separando de esta forma, la estructura de la presentación, entre otros. También se utilizó JavaScript el cual es un lenguaje de programación o de secuencias de comandos que permite implementar funciones complejas en páginas web. Por ejemplo, cada vez que una página web hace algo más que mostrar información estática como: muestras oportunas actualizaciones de contenido, mapas interactivos, animación de gráficos 2D/3D, desplazamiento de máquinas reproductoras de vídeo, etc., se está haciendo uso de este lenguaje.

Se usaron ambas tecnologías con la finalidad de desplegar los datos adquiridos por el sistema de una manera amena para el usuario, y se implementaron desde Bootstrap, que es una biblioteca multiplataforma o conjunto de herramientas de código abierto para diseño de sitios web y aplicaciones web.

Dentro del back-end, para la parte de la base datos se utilizó MySQL Workbench que ofrece un modelo relacional, el cual almacena los datos en tablas, realiza consultas, búsquedas, filtros, entre otras cosas. Se decidió utilizar esta tecnología porque es una herramienta que permite modelar diagramas de entidad-relación para

bases de datos MySQL. Puede utilizarse para diseñar el esquema de una base de datos nueva, documentar una ya existente o realizar una migración compleja, dado que es un software de código abierto y multiplataforma de aplicaciones de escritorio para la administración de servidores de bases de datos MySQL puede construir y manipular los datos de estas.

Parte de la visualización de datos en tiempo real fue implementada con CanvasJS, que es una biblioteca para entorno WEB con tipos diferentes de gráficos y representaciones en dispositivos, incluidos iPhone, iPad, Android, Mac y PC. Esto permite crear cuadros de mando completos que funcionan en todos los dispositivos sin comprometer la capacidad de mantenimiento o la funcionalidad de su aplicación web. Los gráficos incluyen varios temas atractivos y son diez veces más rápidos que las bibliotecas de gráficos convencionales basadas en Flash/SVG, lo que da como resultado paneles de control livianos, visuales y receptivos.

La adquisición de datos se realizó mediante un Arduino Uno y una Ethernet Shield (véase Fig. 2). El Arduino es una tarjeta electrónica que tiene todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador. Es decir, es una placa impresa con los componentes necesarios para que funcione el microcontrolador y su comunicación con un ordenador a través de la comunicación serial. Mientras que el Ethernet Shield es una tarjeta electrónica que permite a un Arduino tener una conectividad al protocolo TCP/IP. Este tipo de protocolo se creó para comunicar a los dispositivos digitales mediante una conexión en red. Ambas placas son asequibles, así como de fácil programación y una de las principales ventajas es el modularidad que tienen, lo cual permite que el sistema sea de arquitectura abierta, permitiendo así la reconfiguración de los datos a adquirir sin importar la naturaleza de estos.

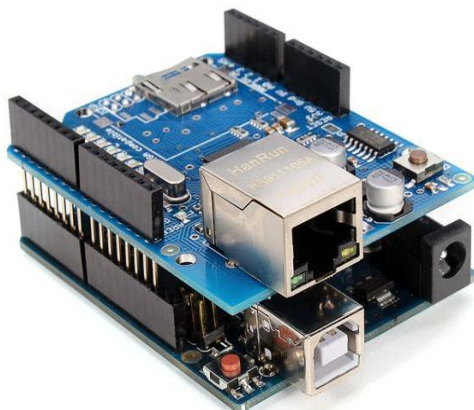


Fig. 2. Acoplamiento de Arduino Uno y Ethernet Shield.

## B. Desarrollo del sistema

El primer paso del desarrollo del sistema es crear una base de datos en MySQL usando el entorno PHPMyAdmin en la cual se almacenará la información de lo recibido por Arduino vía Ethernet.

La base de datos se creó con tres tablas (véase Fig. 3). La primera es 'usuario' la cual tiene tres campos:

- iduser de tipo entero (int),
- usuario de tipo de texto (varchar),
- contraseña de tipo texto (varchar).

El objetivo de la tabla es almacenar a usuarios que tengan permiso de acceder al sistema. La segunda es la tabla 'registro', la cual tiene los campos:

- nombre, apellido, correo electrónico, usuario y contraseña de tipo texto (varchar),
- y una referencia o llave foránea (int), que conecta con la otra tabla que referencia a que usuario se está ingresando.

Con esta tabla se establece un control de acceso de los usuarios al sistema. Por último, la tabla datos, consiste en tres campos:

- entradas de tipo decimal (float),
- salidas de tipo decimal (float) y
- fecha de tipo fecha-hora (datetime).

Esta tabla es el punto central del sistema, dado que es la encargada de almacenar la información que manda la Arduino y de ahí partir con la funcionalidad del sistema, como lo es graficar y generar archivos CSV a partir de esta tabla de información.

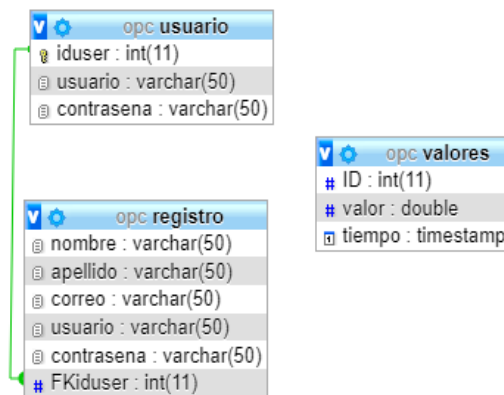


Fig. 3. Diagrama modelo entidad-relación de la base de datos.

Después de la creación de la base de datos, se configura el servidor apache desde el panel de control de XAMPP (véase Fig. 4), donde es necesario seleccionar al botón de config de la opción del servidor Apache, el cual despliega un menú contextual y se selecciona Apache (httpd.conf), lo cual abre un bloc de notas con la configuración del servidor, se busca localhost y el puerto de salida, y ahí se cambia la IP asignada como servidor (véase Fig. 5, lo que está en color azul es la dirección IP del servidor).

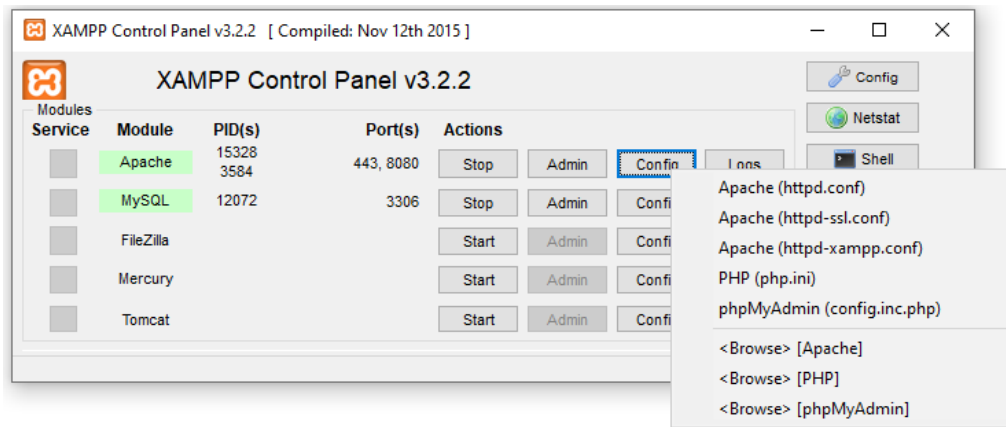


Fig. 4. Panel de control de XAMPP.

```
# If your host doesn't have a registered DNS
name, enter its IP address here.
#
#ServerName localhost:8080
ServerName 192.168.40.100:8080
```

Fig. 5. Archivo de configuración Apache.

6

Una vez configurada la base de datos y el servidor Apache, se programa el Arduino, para la conexión de este con el servidor Apache y la escritura de registros en la base de datos. En la Fig. 6 se muestra un ejemplo del envío de un dato analógico de prueba que simulara un sensor de temperatura. Cabe destacar que los datos enviados pueden ser digitales o analógicos y pueden ser todos los que sean necesarios de acuerdo a las necesidades de la implementación de este sistema.

```
ethernetbd
#include <Ethernet.h>
#include <SPI.h>

// Configuración del Ethernet Shield
byte mac[] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFF, 0xEE}; // Dirección MAC
byte ip[] = { 192,168,40,102 }; // Dirección IP del Arduino
byte server[] = { 192,168,40,100 }; // Dirección IP del servidor
EthernetClient client;
float temperatura;
int analog_pin = 0;

void setup(void) {
  Ethernet.begin(mac, ip); // Inicializamos el Ethernet Shield
  delay(1000); // Esperamos 1 segundo de cortesía
}

void loop(void) {
  temperatura = analogRead(analog_pin);
  temperatura = 5.0*temperatura*100.0/1024.0;
  //Display in Serial Monitor
  Serial.print(temperatura); //Return temperature to Monitor
  Serial.println(" oC");
  // Proceso de envío de muestras al servidor
  Serial.println("Connecting...");
  if (client.connect(server, 8080)>0) { // Conexión con el servidor
    client.print("GET /opc/iot.php?valor="); // Enviamos los datos por GET
    client.print(temperatura);
    client.println(" HTTP/1.0");
    client.println("User-Agent: Arduino 1.0");
    client.println();
    Serial.println("Conectado");
  } else {
    Serial.println("Fallo en la conexión");
  }
  if (!client.connected()) {
    Serial.println("Disconnected!");
  }
  client.stop();
  client.flush();
  delay(60000); // Espero un minuto antes de tomar otra muestra
}
```

Fig. 6. Programación de Arduino para envío de dato analógico de temperatura.



El diagrama de conexión para la prueba del sistema se muestra en la Fig. 7.

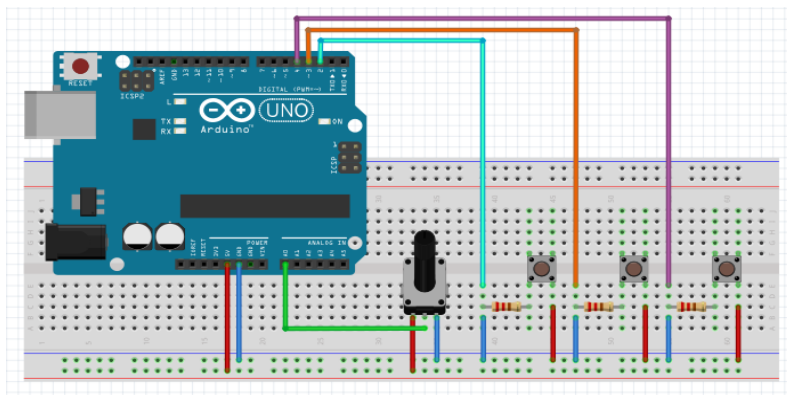


Fig. 7. Conexión de Arduino para envío de datos.

En este diagrama se adquiere una señal analógica por la entrada A0 del Arduino la cual varía con la perilla del potenciómetro el cual simulara un sensor de temperatura, también se adquieren 3 señales digitales en los pines D3, D4 y D5. Como ya se mencionó previamente este método de adquisición permite la modularidad lo cual implica que dependiendo de las necesidades de aplicación se pueden configurar y conectar una gran diversidad de sensores y actuadores.

El sistema hasta este punto está listo para envío de datos al servidor, solo falta la creación del sitio web que permitirá el monitoreo de los datos guardados en la base de datos. Para esto lo primero es crear una carpeta (en este caso se llamó proyecto) en la siguiente ruta: C:\xampp\htdocs\, la cual se encarga de arrancar el servidor Apache con las páginas WEB en conjunto con la parte lógica y el PHP. En esta carpeta se crean dos archivos, el primero llamado config.php el cual contiene la información para establecer una conexión con la base de datos, el servidor, el usuario y contraseña del servidor Apache. El segundo es `iot.php`, su funcionalidad es subir los datos recibidos de los sensores a la base de datos. Los datos se cargan a la base de datos a través del método GET.

Con estos archivos se asegura el arranque del servidor, del sistema web y la conectividad de la base de datos desde el Arduino. Después de esto, se realiza la programación de las páginas del sitio web, donde se utilizaron librerías de Bootstrap el cual mejora la apariencia de estas, además están en PHP para que corran desde el servidor. El sitio consta de 6 páginas:

- La primera página web es la de inicio de sesión y tiene como objetivo que el usuario pueda ingresar al sistema tecleando credenciales de acceso como: un usuario y una contraseña.
- La segunda página web consiste en el registro del usuario, si este aún no cuenta con credenciales de acceso, podrá registrarse para obtenerlas.
- La tercera página web consta de un menú de opciones, que despliega dos acciones: en primera instancia un monitoreo de tiempo real de los datos obtenidos y de manera simultánea guardados en la base de datos desde el Arduino Uno y la Ethernet Shield, en esta parte se da la opción de guardado de las sesiones en un archivo .CSV lo cual da pie a la segunda opción que consiste en la carga de estos archivos y la visualización de estos para la creación de reportes.



8

- La cuarta página permite la visualización de gráficos en tiempo real, se implementó la librería Canvas JS, la cual permite generar las ondas de las señales (analógicas) adquiridas de manera coordinada directamente en el espacio establecido para su representación. Así mismo cuenta con opción de hacer zoom en una parte específica de la gráfica y mover de un lado a otro o bien regresar al estado inicial. También se muestran las señales (digitales) adquiridas a modo de pequeños leds. Desde aquí se pueden guardar los datos en un archivo como previamente se describió para su futura visualización según se requiera.
- La quinta página web consiste en la simulación de los archivos previamente guardados que contienen la información adquirida en tiempo real. El objetivo de esta página es visualizar los datos mediante una gráfica de manera similar a la de tiempo real.
- Y por último la sexta página consiste en visualizar dos gráficas, la primera es de la simulación del archivo previamente guardado (CSV) que contiene la información adquirida en tiempo real, y en la segunda un zoom de la primera.

En la Fig. 8 se presenta el código QR para acceder a la programación del sitio web propuesto para los lectores que quieran replicarlo.



Fig. 8. Código QR para acceder a la programación del sitio web propuesto.

Una vez terminadas las páginas del sitio web se procede a realizar pruebas de conexión y visualización del sitio.

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el testeo del sitio web se hicieron una serie de pruebas de conectividad y funcionalidad. Primero se realizó una prueba de conexión del Arduino con la base de datos, donde se observó el correcto guardado de información de los datos adquiridos (véase Fig. 9).

EntradaAnalogica	EntradaDigital	fecha
200	0	2021/06/23 15:40:00
155	1	2021/06/22 14:40:00
222	0	2021/06/20 14:45:00
156	1	2021/06/15 12:40:00
187	0	2021/06/05 14:45:00

Fig. 9. Tabla con información de monitoreo.

Después se realizó el análisis de funcionalidad de cada una de las páginas del sitio web. La primera página, la de inicio de sesión (véase Fig. 10) se probó dando de alta usuarios.



Fig. 10. Página de inicio de sesión.

Donde el registro de los usuarios solicita los siguientes datos: nombre completo, apellido, correo electrónico, contraseña y confirmar contraseña (véase Fig. 11).



Fig. 11. Página creación de cuenta nueva.

Una vez llenados estos datos se registran los usuarios, y se guardan en la base de datos donde se verificó el correcto funcionamiento de esta página (véase Fig. 12).

iduser	usuario	contrasena
1	asosa	aEsa1@
2	maguilar	mMarA9@
3	mmorales	orAles1@

Fig. 12. Usuarios registrados en base de datos.

Con los usuarios registrados se procedió a acceder al sistema donde se presenta una página con un menú de opciones (véase Fig. 13), donde primero se eligió la de monitoreo en tiempo real.



Fig. 13. Página con menú de opciones del sistema.

En la página que se abre para el monitoreo de datos en tiempo real (véase Fig. 14), se visualiza en una gráfica los datos analógicos adquiridos desde Arduino y al lado izquierdo de esta los datos digitales en forma de leds. También se tiene un botón del lado superior izquierdo con el cual se inicializa el grabado de estos datos en un archivo CSV, en la parte inferior de la gráfica se da la opción para el guardado de este archivo.

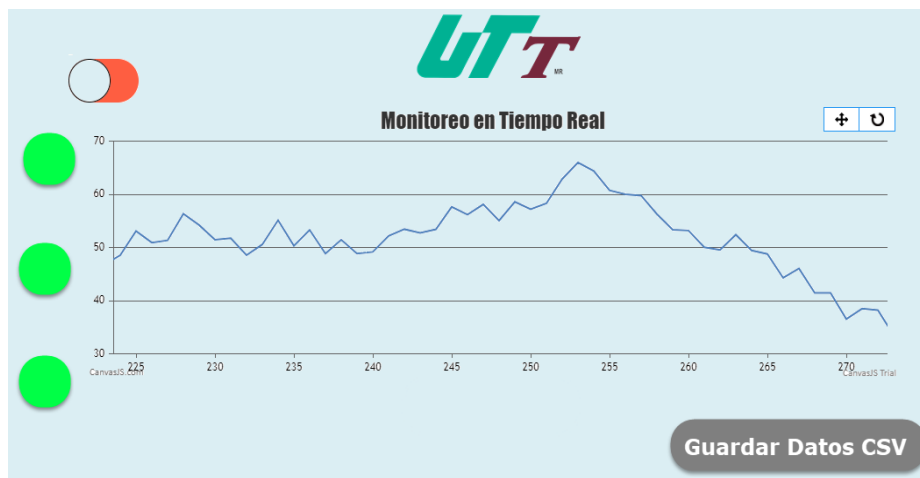


Fig. 14. Gráfica generada en tiempo real.

En la gráfica de esta página se pueden ejecutar acercamientos posicionando el puntero del ratón en la parte que se desea visualizar, en seguida, en la parte superior derecha de la gráfica aparece dos iconos, uno en forma de cruz, el cual el usuario puede mover la gráfica hacia la derecha o izquierda según sea la necesidad, el segundo icono que se encuentra en la parte superior derecha es regresar la gráfica en un estado normal.

Por último, se comprobó la opción de simulación donde la página solicita el archivo previamente guardado con formato CSV para cargar los datos a simular (véase Fig. 15).

11

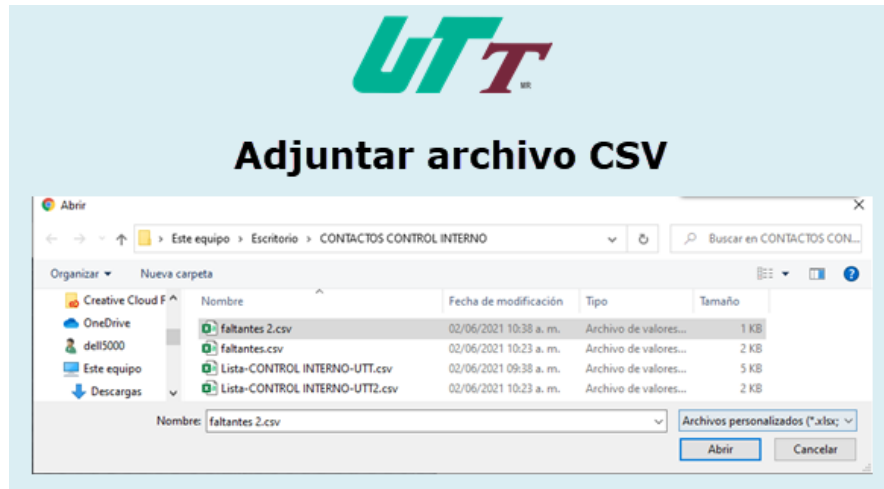


Fig. 15. Página donde se adjunta archivo CSV.

Una vez cargado el archivo CSV seleccionado se abre la página con las gráficas de la simulación de los datos contenidos en este (véase Fig. 16). Cabe destacar que este tipo de archivo es un tipo de formato que contiene información separada por comas y se puede ver en Excel o bloc de notas.

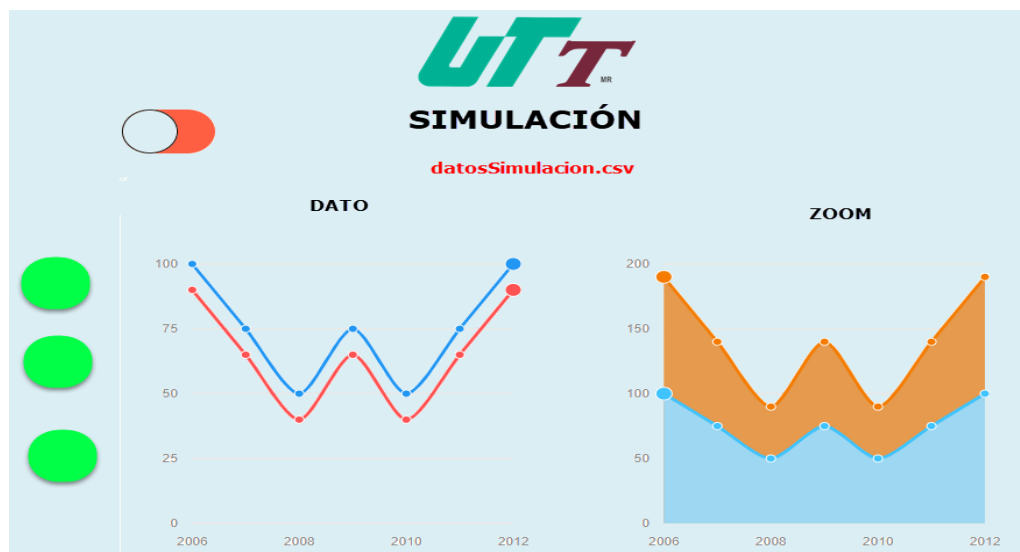


Fig. 16. Página de simulación de datos.

La página de simulación de datos está conformada por dos gráficas, la primera con los datos tomados del archivo seleccionado y la segunda de realizar un zoom a la primera.

De manera satisfactoria se probó el correcto funcionamiento del sitio desarrollado, sin presentarse ningún problema de conectividad o funcionalidad en las páginas que lo conforman.

#### IV. CONCLUSIONES

12

La IoT promete abrir la puerta a un mundo revolucionario, un mundo “inteligente” totalmente interconectado en el cual las relaciones entre los objetos y su entorno y las personas se entrelazan aún más. Cada día existen más soluciones para la implementación en diferentes entornos de este arquetipo.

El sistema desarrollado cumple con el objetivo de implementación para el monitoreo de manera remota de datos, resaltando la modularidad del sistema que ofrece una arquitectura abierta. Además de su interoperabilidad por las tecnologías implementadas y su método de adquisición, lo cual le da versatilidad para poder usarse en varios dispositivos, así como en diversas áreas de aplicación. Destacando que el usuario final podrá acceder a través de cualquier navegador instalado en cualquier sistema operativo (Windows, Linux, Unix, Macintosh, etcétera).

Los tiempos de respuesta entre el mando vía Web y la ejecución en el dispositivo electrónico dependen de la velocidad de Internet utilizada, pero no se requieren grandes velocidades para conseguir un manejo óptimo aproximado al tiempo real.

La descripción del desarrollo del sistema deja abierta la posibilidad de personificación de este de acuerdo a las necesidades de aplicación, de una manera sencilla tanto en software como en hardware, permitiendo de esta manera la interconexión característica de un sistema IoT.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Mardiana, H. Wan, “Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey,” *Computer Networks*, vol. 148, 2019, pp. 283-294, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.025>
- [2] A. J. Jara, D. Genoud, Y. Bocchi, *Big Data for Cyber Physical Systems: An Analysis of Challenges, Solutions and Opportunities*, 2014. <https://doi.org/376-380.10.1109/IMIS.2014.139>
- [3] M. Okuda, T. Mizuya, and T. Nagao, “Development of iot testbed using opc ua and database on cloud,” *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2017.
- [4] P. L. Gallegos-Segovia, J. F. Bravo-Torres, J. J. Argudo-Parra, E. J. Sacoto-Cabrera, V. M. Larios-Rosillo, “Internet of Things as an attack vector to critical infrastructures of cities,” *2017 International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS)*, Cozumel, 2017, pp. 117-120.
- [5] A. Contan, C. Dehelean, L. Miclea, “Test automation pyramid from theory to practice,” *2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, 2018, pp. 1-5, doi: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2018.8402699>
- [6] J. J. Lee, H. A. Kao, S. Yang, “Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment,” *Procedia Cirp*, vol. 16, pp. 3-8, 2014.
- [7] S. Bhardwaj, P. Larbig, R. Khondoker, K. Bayarou, “Survey of domain specific languages to build packet parsers for industrial protocols,” *2017 20th International Conference of Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2017.
- [8] N. Vikram, K. Harish, M. Nihaal, R. Umesh, A. Shetty, A. Kumar, “A low cost home automation system using wi-fi based wireless sensor network incorporating internet of things (iot),” *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*, 2017.
- [9] N. Agrawal, S. Singhal, “Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino,” in *Computing, Communication & Automation (ICCCA), 2015 International Conference on. IEEE*, 2015, pp. 928-932.

## Diseño de un sistema automático de embotellado y sellado de botellas para jugos de 250 mm<sup>3</sup>

Design of an Automatic System for Bottling and Sealing Bottles for Juices of 250 mm<sup>3</sup>

Jessica Gisella **Maradey-Lázaro**<sup>1</sup>, Arly Darío **Rincón-Quintero**<sup>2</sup>, Jhon Alexander **Caballero- Moreno**<sup>3</sup>,  
Gustavo Andrés **Castellanos-Gómez**<sup>4</sup>, Camilo Leonardo **Sandoval-Rodriguez**<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Bucaramanga, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0003-2319-1965> | [jmaredey@unab.edu.co](mailto:jmaredey@unab.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad del País Vasco, ESPAÑA | Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0002-4479-5613> | [arincon007@ikasle.ehu.eus](mailto:arincon007@ikasle.ehu.eus) - [arincon@correo.uts.edu.co](mailto:arincon@correo.uts.edu.co)

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Bucaramanga, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0003-2319-1965> | [jcaballero@unab.edu.co](mailto:jcaballero@unab.edu.co)

<sup>4</sup>Universidad Autónoma de Bucaramanga, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0003-2319-1965> | [gcastellanos@unab.edu.co](mailto:gcastellanos@unab.edu.co)

<sup>5</sup>Universidad del País Vasco, ESPAÑA | Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA

<https://orcid.org/0000-0001-8584-0137> | [csandoval001@ikasle.ehu.eus](mailto:csandoval001@ikasle.ehu.eus) - [csandoval@correo.uts.edu.co](mailto:csandoval@correo.uts.edu.co)

Recibido 25-01-2022, aceptado 01-03-2022

### Resumen

Actualmente, la mayoría de los procesos de producción en la industria alimentaria requiere niveles de automatización altos, dada la precisión y el tiempo total consumido son las principales variables que influyen los costos de fabricación, la productividad, la competitividad y la satisfacción de los clientes. Este artículo pretende mostrar el diseño de un prototipo de sistema automático para embotellado y sellado de botellas específicamente de 250 mm<sup>3</sup> incluyendo la definición de criterios de selección basados en el presupuesto planeado.

**Palabras clave:** sellado, embotellado, automatización, botellas.

### Abstract

Currently, most of the production processes in the food industry require high levels of automation, given precision and the total time consumed are the main variables that influence manufacturing costs, productivity, competitiveness, and customer satisfaction. This article aims to show the design of a prototype of an automatic system for bottling and sealing specifically 250 mm<sup>3</sup> bottles, including the implementation of an easy-to-use HMI for operators who carry out this process.

**Index terms:** sealing, bottling, automation, bottles.

## I. INTRODUCCIÓN

La automatización industrial se ha convertido en un área en pleno desarrollo y de gran importancia para todos los sectores industriales, ya que permite mejorar la productividad de las empresas y la calidad de sus productos. En la industria alimentaria se producen gran variedad de productos en cantidades, tamaños y presentaciones que buscan ofrecer al cliente soluciones innovadoras que respondan a sus necesidades en seguridad y confiabilidad en la marca y en el producto. Actualmente, las fábricas (pequeñas o medianas) deben implementar nuevas tecnologías con el fin de incrementar su producción y brindar productos calificados para ingresar con fuerza en los mercados regionales y nacionales [1], [2].

Particularmente, la producción de bebidas es uno de los sectores económicos más influyentes en el PIB de un país. Consta de procesos iniciando en el lavado y terminando con el etiquetado de las botellas. En este artículo nos centraremos en dos procesos clave: embotellado y sellado [3], [4].

El embotellado es el proceso principal en el negocio de las bebidas, desde el agua mineral, hasta las gaseosas, jugos, cervezas y todo aquello que podamos envasar en una botella [5], [6]. Es claro que antes se realiza el lavado y la esterilización bajo estrictos requerimientos según normativa vigente en cada país. Puede decirse, que el proceso de embotellado es el eslabón que une una producción satisfactoria, con una venta exitosa [7], [8]. Para el llenado de las botellas, existen múltiples alternativas como es un sistema de boquillas, las cuales son alimentadas por una tolva donde se reparte a través de tuberías y válvulas. Posteriormente para el sellado de la botella puede realizarse un cierre a presión, mediante un alimentador con tapones de plástico o roscas, con gotero, flex top, cápsulas, sellado en foil, metálicas, etcétera [9], [10].

Es imprescindible tener control sobre las variables del proceso, ya sea usando visión artificial, celdas de carga, poka yokes o estaciones de medición y chequeo visual que permitan garantizar la integridad del producto y la validez del proceso productivo [11], [12]. Otros estudios pueden incluir una evaluación energética buscando mejorar la eficiencia de recursos físicos de la locación como el de iluminación y pronosticar la demanda usando técnicas de inteligencia artificial [13], [14]. Establecer el equilibrio entre los requerimientos del cliente, las necesidades de crecimiento y mejoramiento de las empresas teniendo en cuenta la normativa vigente, la competitividad y productividad con el proceso automatizado se evidencian en procesos similares como el de cerveza artesanal, en el cual pasaron de producir 125 unidades por semana a 90 unidades por hora [15], [16].

Por todo lo anterior, el presente trabajo busca mostrar cada una de las fases que se realizaron para lograr el diseño de un sistema automático de embotellado y sellado de botellas, destacando la planificación de los costos vs requerimientos técnicos, así mismo, los cálculos matemáticos, la definición de criterios de selección de controlador y programación para la descripción completa del proceso basado en la normatividad vigente [17], [18].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del producto, se seleccionó una metodología denominada “V” de cuatro niveles para abordar este caso. Esta metodología es una representación gráfica del ciclo de vida de desarrollo del sistema, que resume las principales etapas con las entregas correspondientes [19], [20].

### Marco conceptual para el diseño

Dado que el movimiento del manipulador debe ser controlado para así obtener la precisión que lo caracteriza, se presenta a continuación el modelo cinemático del manipulador. Utilizando el método de Denavit-Hartenberg se resolvió la cinemática de posición y velocidad [21], cuyo esquema puede observarse en la Fig. 1.

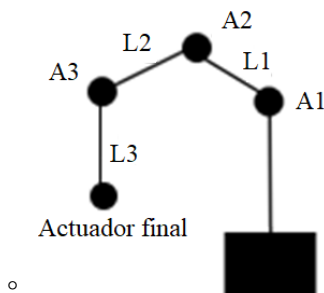


Fig. 1. Robot cartesiano simplificado.

Luego se realizan las matrices de transformación, teniendo presente siempre que primero se hace rotación en  $z$ , desplazamiento en  $z$ , desplazamiento en  $x$  y rotación en  $x$ , en caso de que se necesite un movimiento más para que coincida, significa que quedaron mal ubicados los sistemas de coordenadas [22]. Se puede observar que longitudes para el caso del robot cartesiano son variables.

$$T_1^0 = Q_{z,\theta_1}, D_{z,L_1} D_{x,L_1}, Q_{x,\theta_1} \quad (1)$$

$$T_2^1 = Q_{z,\theta_2}, D_{z,L_2} D_{x,L_2}, Q_{x,\theta_2} \quad (2)$$

$$T_3^2 = Q_{z,\theta_3}, D_{z,L_3} D_{x,L_3}, Q_{x,\theta_3} \quad (3)$$

$$T_3^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 \quad (4)$$

Posteriormente realizada la cinemática de posición pasamos, a realizar la cinemática de velocidad, la cual se facilita mediante este método pues ya que teniendo las matrices de transformación solo es derivar, hacer la transpuesta y multiplicar por la inversa [23], [24]. El esquema puede verse en la Fig. 2.

Para los cálculos del tornillo sin fin, se utilizó se tuvo en cuenta que como característica principal es:

- El paso ( $p$ ) es la distancia que hay entre dos hilos adyacentes, medida paralelamente el eje de la rosca, y es el recíproco de *número de hilos por pulgada*,  $N$ .
- El avance ( $L$ ) es la distancia que desplaza una tuerca, cuando se da una vuelta en el caso de la rosca simple (o rosca de un solo filete), el avance es igual al paso.

$L = \text{avance}$

$p = \text{paso de la roca}$

$h = \text{altura de la rosca}$

$n = \text{numero de entradas o files de la roca}$

$\phi = \text{Angulo de la hélice}$

$h = 0,5 p$

$L = n.p$

$$\text{Tang}(\phi) = \frac{L}{\pi dm} \quad (5)$$

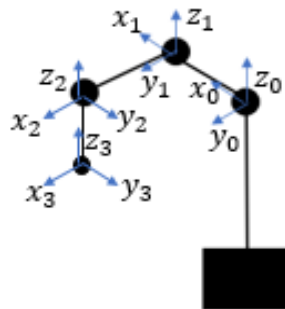


Fig. 2. Robot cartesiano sistemas de coordenadas.



El torque necesario para elevar un peso, que en nuestro caso son las respectivas latas de lechera, se detalla en la Fig. 3 y la Fig. 4.

$T$  = par de torsión requerido para levantar la carga  $F$

$F$  = carga

$dm$  = diámetro medio de la rosca

$u$  = coeficiente de rozamiento

$de$  = diámetro exterior de la rosca

$$T = \frac{Fdm(1 + \pi u dm \sec(A))}{2(\pi dm - uL \sec(A))}$$

$$T = \frac{Fdm(1 + \pi u dm)}{2(\pi dm - uL)}$$

$$dm = de - p$$

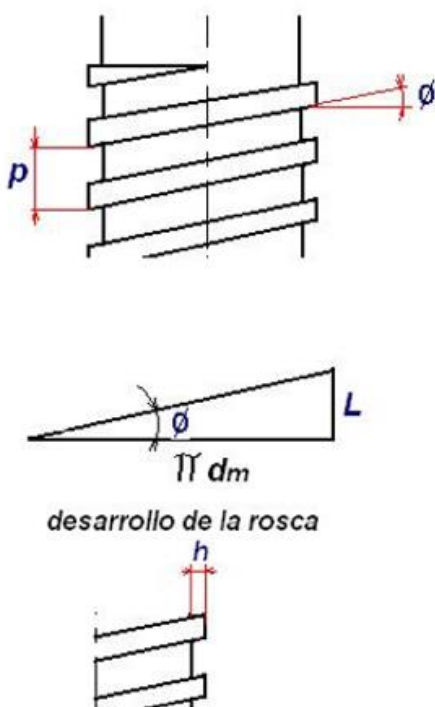


Fig. 3. Geometría del tornillo sin fin [25].

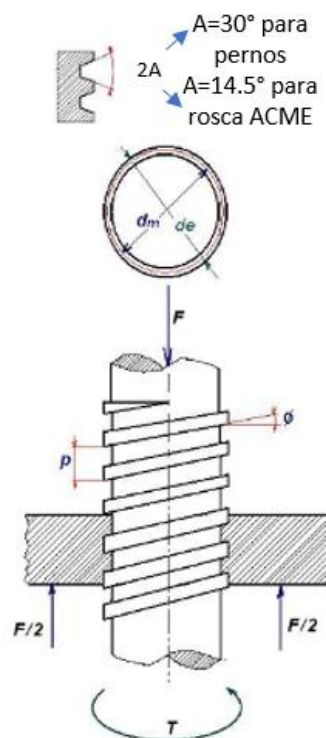


Fig. 4. Torque necesario para elevar el peso [26].

### Modelo del prototipo en CAD

El sistema consta de 4 etapas en el proceso de embotellado, a continuación, se especifica cada una de ellas:

*Primera etapa.* El proceso inicia con una carga dentro del contenedor de botellas y consiste en la secuencia de dos servomotores, que por medio de una comprobación de sensores infrarrojos despacha cada una de las botellas,

es decir, se activa el primer servomotor y a continuación se lleva a cabo una detección del sensor, se cierra el primer servomotor y seguido de ellos el último que dispensa la botella al círculo giratorio principal de movimiento para cada una de las etapas posteriores. Este proceso es repetitivo y se lleva a cabo con la validación del sensor presente en la siguiente estación [27].

*Segunda etapa.* Consiste en la inyección de líquido del tanque a la botella, posterior de la validación de la posición donde se encuentra la botella, esta da paso a la inyección del líquido por medio de un sensor de flujo y una electroválvula para garantizar que no se desperdicie el fluido y se inyecte en el instante preciso. Por dentro del tanque se realiza una comprobación por medio de dos flotadores para verificar si hay producto en el tanque [28].

*Tercera etapa.* Consiste en la verificación del tercer desplazamiento de la botella en el círculo giratorio principal y en el que se le enroscará la tapa a la botella. El proceso es de la siguiente manera, de la misma forma como en el contenedor de botellas las tapas se encuentran en un contenedor y consta de una verificación por un sensor infrarrojo y dos servomotores que desplazan la tapa a un punto acogida por un molde para enroscado, al llegar al punto dispuesto un brazo con dos servomotores de dos grados de libertad, presionan la tapa con el molde y la llevan al punto donde se encuentra la botella para que, en ese momento, con un motorreductor asegurado al molde se pueda enroscar y posteriormente desplazar a la etapa 4 o etapa final [29].

*Cuarta etapa.* Solo consiste en el último desplazamiento del círculo giratorio que transporta la botella tapada por un orificio en la base donde se está moviendo. Todo el proceso está siendo verificado y monitoreado, de esta forma se hace repetitivo. En la Fig. 5 se puede observar el prototipo en CAD.

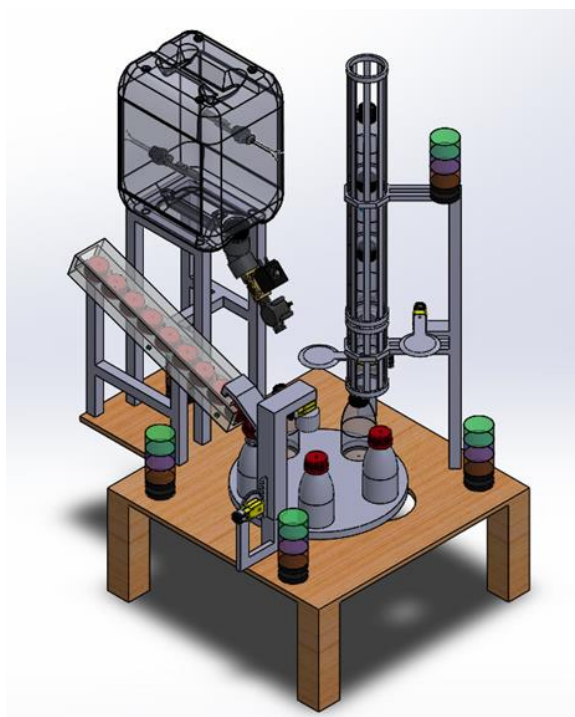


Fig. 5. Vista isométrica.

### Selección de la instrumentación

De acuerdo con los cálculos realizados, se procede a revisar en el mercado la instrumentación disponible de acuerdo con el presupuesto y a los requerimientos técnicos del sistema a implementar. Para este propósito se usan matrices de ponderación como puede verse en las tablas a continuación (Tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7).

Para seleccionar el controlador se toman las diversas opciones del mercado y mediante uso nuevamente de una matriz se listan los requerimientos, cuyo resultado se opta por AT mega 2560.

La memoria se define como la capacidad de memoria de los sistemas embebidos, siendo las memorias evaluadas EEPROM, SRAM y FLASH. Se define en calificación en un rango de 1 a 5, siendo 1 (menor almacenamiento en memoria) y 5 (mayor capacidad de 2 memoria). Se pretende utilizar un sistema embebido con microcontrolador de una capacidad considerable.

**TABLA. 1.** ESPECIFICACIONES DE SENSORES Y VÁLVULAS.

Nombre	Salida	Voltaje	Material
Sensor de flujo YF-S201	(1/2)	5-18 V	Plástico
Sensor de flujo por efecto hall	(1/2)	5 V	Metal
Sensor de flujo + electroválvula	(1/2)	5-24 V	Plástico
Electroválvula de 4 salidas	(3/4)	12 V	Plástico
Electroválvula DCF-HT15	(1/2)	12 V	Metal
Electroválvula 10.5 mm de presión	(3/4)	24 V	Plástico
Electroválvula plástica sin presión	(3/4)	12 V	Plástico

**TABLA. 2.** ESPECIFICACIONES DEL MOTORREDUCTOR.

Nombre	RPM	Voltaje	Material
Moterreductor N20298	50	6 V	Metal
Moterreductor POLOLU	1000	6 V	Metal
Moterreductor	80	24 V	Metal
Moterreductor DFROBOT	700	12 V	Metal
Moterreductor TT	170	5 V	Plástico

**TABLA. 3.** ESPECIFICACIONES DE SENSORES PARA EL CONTROL.

Nombre	Distancia	Voltaje	Material
Infrarrojo de barrea perimetral	60 m	12-18 V	Aluminio
Infrarrojo evasor de obstáculos	2-8 cm	3.3 – 5 V	Modulo
Sensor de proximidad E18-D80NK	3-8 cm	5 V	Plástico
Sensor de línea QRD1114	5 mm	3-5 V	Modulo




**TABLA. 4** ESPECIFICACIONES DE SENSORES DE NIVEL.

Nombre	Temperatura (°C)	Vol de con	Cable	Flotador
Sensor flotador horizontal	-30 , 125	100 V	34 cm	8.7 cm
Sensor flotador vertical	-20 , 80	100-250 V	30.5 cm	5.8 cm

**TABLA. 5.** ESPECIFICACIONES DE MOTOR PASO A PASO PM55L-048-HP69.

Características de la referencia			
Tamaño del motor (Referencia)		PM55L-048	
Numero de pasos por rotación		48 (7.5° / paso)	
Método de conducción		2-2 fase	
Circuito de accionamiento	Unipolar – voltaje constante	Bipolar Chopper	
Voltaje de accionamiento	24 V	24 V	
Corriente / fase		800 mA	
Resistencia de la bobina		30 Ohmios	5.5 Ohmios
Unidad de circuito integrado		2SC3346	UDN2916B-V
Material de imán	Ferrite plastic magnet (MSPL)		
	Polar anisotropy ferrite sintered magnet (MS50)		
	Nd-Fe_B bonded marnet (MS70)		
Resistencia de aislamiento		100 m (Ohmios) min	
Resistencia dieléctrica		AC 500 V	1 min
Clase de aislamiento		CLASS E	
Temperatura de operación		-10 °C	hasta 50°C
Temperatura de almacenamiento		-30 °C	hasta 80°C
Operación en humedad		20% RH	hasta 90%RH

**TABLA. 6.** SENSORES DE FLUJO.

Sensor de flujo	Modelo	Conexión	Caudal
	YF-S201	½ “	1-30 L/min
	FS300A	¾ “	1-60 L/min
	FS400A	1 “	1-60 L/min

**TABLA. 7.** CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR.

Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560	ATmega32U4
Criterio de selección	Peso (%)	Calificación	Calificación
Memoria	22	3.5	3.7
Rango de voltaje de alimentación	16	3.8	3.8
Número de entradas y salidas (Analógicas y digitales)	25	3.3	3.9
Pines de PWM	22	3.5	3.6
Costo	15	4.6	4.6
Puntuación total	3.663	4.299	3.879
Rango	3	1	2
¿Continúa?	No	Sí	No

Para determinar los puertos (entrada y salida) se mira la cantidad de pines de entrada y salida digitales y analógicos de acuerdo con la necesidad, se busca mayor disponibilidad de puertos por si se requiere el uso de más puertos a futuro. Sobre los Puertos de PW se evalúa cuántos pines de PWM tiene disponible cada sistema embebido, consideramos mejor los sistemas que posean mayor cantidad de pines de PWM (véase Tablas 8, 9 y 10).

8

**TABLA. 8.** CRITERIOS DE MEMORIA.

Memoria (kB)	Sistema embebido			
		Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino Micro
	Flash	32	256	32
	EEPROM	1	4	1
	SRAM	2	8	2.5

**TABLA. 9.** PINES ANÁLOGOS.

	Sistema embebido		
	Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino Micro
Digital I/O	14	54	20
Analog pins	6	16	12

**TABLA. 10.** PINES PWM.

	Sistema embebido		
	Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino Micro
Analog pins	6	15	7

Costo. Se considera que, a menor precio, la calificación será mejor, los valores de precio son obtenidos de precios estándar a los que se pueden comprar.

Por otro lado, se muestra a continuación un flujograma del proceso que se lleva a cabo, con una secuencia manual y automática.

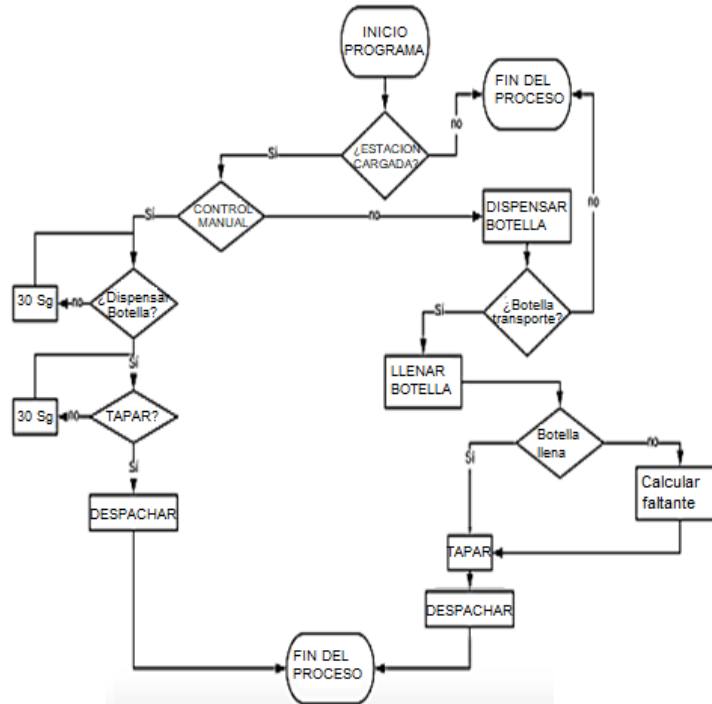


Fig. 6 Secuencia manual y automática [Autores].

TABLA. 11 COMPARACIÓN DE COSTOS.

	Sistema embebido		
	Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino Micro
Costo (\$) COP	24000	45000	19000

Como lenguaje de programación se seleccionó el lenguaje C90 ya que es un lenguaje muy similar a lenguajes ya trabajados por lo que resulta familiar programarlo, además usamos la herramienta aprendida en la teoría (Atmel Studio). Para realizar la interfaz HMI es necesario definir la secuencia manual y automática que seguirá la máquina, la cual se muestra en la Fig. 6. El modo automático para el proceso se describe a continuación:

1. El proceso inicia con la interacción de un pulsador para el inicio del programa y funcionamiento del proceso.
2. El proceso inicia con la introducción del valor deseado de producción resultante al final de la línea, es decir: si se desea embotellar 20 botellas que el sistema tome las decisiones para ratificar la introducción del dato.
3. Posteriormente tras la introducción del dato, el sistema hace un barrido para verificación de producto en las etapas, con señales visuales en su planta e interfaz (verificación de botellas, líquido y tapas).
4. El inicio del proceso con la etapa de dispensador de botella, está definida por dos placas separadoras de producto, es decir, inicialmente las botellas estarán interrumpidas por una placa a que impide la caída

de la botella y la *b* que es la dispensadora de caída antes de incorporarse en el círculo de transporte. El proceso mantiene las dos placas apagadas es decir impidiendo, el paso del compartimento *a* y el *b*, la compuerta *a* se mueve y permite el paso de solo una botella, luego se cierra la misma y abre la *b*, para dejar caer solo una botella. Posteriormente se apaga la *b* y reinicia para solamente dejar en el comportamiento de separador una botella nada más.

5. Seguido, el círculo transporta la botella y pasa al llenado de la botella. El contenedor se llena con el líquido necesario pues estará controlado por un sensor de flujo, dentro del tanque se realiza un control de tanque y una bomba impulsa el líquido.
6. Luego de realizado el llenado del envase pasa a la etapa de tapado, que tiene en primer lugar el posicionamiento de una tapa en orificio para poder enroscarla e incorporarla al envase. Seguido, el círculo transporta y solamente deja caer el envase ya tapado y llenado.
7. Cada etapa tiene un tiempo establecido que solamente al cumplir los tiempos totales será posible el desplazamiento. Cada proceso está incorporado a 3 señales de alerta verde funcionamiento correcto, amarillo en proceso y rojo detección de error e interrupción de proceso total.
8. El funcionamiento manual del proceso está basado en la interacción con pulsadores de todo el proceso, y que el operario tiene el control total de los tiempos en la producción para el traspaso de etapa a etapa. Ratifica su funcionamiento, pero reduce en un valor grande el tiempo de producción.

### Prototipo construido

Para la construcción del prototipo se realizaron los siguientes procesos:

1. *Soporte base.* El soporte base consta de 9 varillas de acero que forman una mesa reforzada por tornillos, pero soldada con punto de soldadura. Principalmente se establecen las medidas y cortes para la mesa de acero, luego se procede a derretir el material para la soldadura con puntos de soldadura en cada uno de los lados de la terminación del tubo de acople. Finalmente, la soldadura reforzada se utiliza para instalar roscado interno dentro de algunos de los tubos para poder implementar diferentes posiciones del tubo.
2. *Placa con orificios de desplazamiento.* Cortada en MDF de 3 mm para reducir en su mayoría el peso y su versatilidad al corte. Consta de un círculo exterior de 40 cm que, dibujada como una cruz, implementa las 4 posiciones de desplazamiento que encuentra el sistema por completo. Dentro de cada punta de la cruz se encuentra un orificio con la media de la botella y con una tolerancia de  $\pm 1$  mm. Por lo cual cada orificio limita su movimiento y lo desplaza al mismo tiempo.
3. *Corte de bloque de madera.* Un bloque de 10×10cm no es de fácil acceso y mucho menos de fácil corte. Con sierra fija de aserradero, se corta un bloque de 10×10×10 cm para cumplir la funcionalidad de soporte del motor paso a paso. Posteriormente pasa a un proceso de lijado por medio de lija de vibración.

El prototipo final y construido se muestra en la Fig. 7.



Fig. 7. Prototipo construido.

### III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El logro más importante es brindar una solución económica y automática para el embotellado y sellado de botellas para jugos en la industria alimenticia. El proceso de automatización presentado en este artículo, a mayor escala, puede resolver y facilitar los problemas de la industria con mayor rapidez y precisión para un volumen específico. Como recomendación, se propone una mayor investigación en este sistema con el fin de implementar otros componentes al proyecto que puedan convertirlo en una máquina deseada en el mercado industrial. Además, aplicar otras metodologías como Diseño de Fabricación y Montaje (DFMA) y Economía Circular. Es imprescindible si es posible establecer una configuración experimental más extensa y realizar los respectivos protocolos de pruebas que permitan validar su funcionamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional de las Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB).

#### REFERENCIAS

- [1] R. G. Robertshaw, "Automatic cleaning and disinfection of suction bottles," *J. Hosp. Infect.*, vol. 3, no. 3, pp. 299-302, 1982.
- [2] R. Cachon, D. Alwazeer, "14 - Quality Performance Assessment of Gas Injection During Juice Processing and Conventional Preservation Technologies," A. M. Grumezescu et al., Academic Press, 2019, pp. 465-485.
- [3] P. J. Fellows, "25 - Filling and sealing of containers," in *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 4th ed., Woodhead Publishing, 2017, pp. 1045-1076.
- [4] A. Rincón-Quintero, L. Portillo-Valdés, A. Meneses-Jácome, J. Ascanio Villabona, B. Tarazona Romero, M. Durán-Sarmiento, "Performance Evaluation and Effectiveness of a Solar-Biomass Hybrid Dryer for Drying Homogeneous of Cocoa Beans Using LabView Software and Arduino Hardware," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 764, 2021, pp. 238-252.



- [5] P. R. Ashurst, R. Hargitt, F. Palmer, "Chapter 10 - Packaging, Storage and Distribution of Soft Drinks and Fruit Juice," in *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, P. R. Ashurst, R. Hargitt, et al., Woodhead Publishing, 2017, pp. 161–184.
- [6] R. S. Matche, *Chapter 32 - Packaging Technologies for Fruit Juices*, San Diego: Academic Press, 2018, pp. 637–666.
- [7] Z. Berk, *Chapter 8 - Production of single-strength citrus juices*, San Diego: Academic Press, 2016, pp. 127–185.
- [8] T. Koutchma, K. Warriner, *Chapter 3 - Case study of validation of high hydrostatic pressure processing of fruit and vegetable smoothies in PET bottles*, Academic Press, 2022, pp. 99–112.
- [9] A. Rincón-Quintero, O. Lengerke Perez, J. Maradey Lazaro, G. Garrido-Silva, C. Sandoval Rodriguez, J. Osorio-Lizarazo, *Determination of Heat Transfer Coefficients in Natural and Forced Convection for Different Geometric Configurations, Using a Prototype Controlled by LabView Software and Arduino Hardware*, 2021.
- [10] M. Strobl, *Chapter 25 - Inertization and bottling*, Academic Press, 2022, pp. 327–338.
- [11] P. R. Ashurst, R. Hargitt, F. Palmer, "3 - Canning of juices, fruit drinks, and water," in *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 135–168.
- [12] G. Garrido-Silva, J. Maradey Lazaro, A. Rincón-Quintero, O. Lengerke Perez, C. Sandoval Rodriguez, C. Cardenas-Arias, "Estimation of the Energy Consumption of an Electric Utility Vehicle: A Case Study," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 763, 2021, pp. 257–272.
- [13] C. Aversa, M. Barletta, A. Gisario, E. Pizzi, R. Prati, S. Vesco, "Design, manufacturing and preliminary assessment of the suitability of bioplastic bottles for wine packaging," *Polym. Test.*, vol. 100, p. 107–227, 2021.
- [14] C. Buvé *et al.*, "Combining untargeted, targeted and sensory data to investigate the impact of storage on food volatiles: A case study on strawberry juice," *Food Res. Int.*, vol. 113, pp. 382–391, 2018.
- [15] V. Sivaramakrishna, F. Raspante, S. Palaniappan, M. A. Pascall, "PET bottles seal quality testing using an on-line pressure differential detector," *J. Food Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 645–654, 2007.
- [16] J. G. M. Lázaro and C. L. S.- Rodríguez, "Design and set up of a pulverized panela machine," vol. 9, no. 4, pp. 812–828, 2021.
- [17] C. Buvé *et al.*, "Kinetics of colour changes in pasteurised strawberry juice during storage," *J. Food Eng.*, vol. 216, pp. 42–51, 2018.
- [18] Y. Tachwali, Y. Al-Assaf, A. R. Al-Ali, "Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 2, pp. 266–285, 2007.
- [19] E. Morelle, A. Rudolph, C. McHardy, and C. Rauh, "Detection and prediction of foam evolution during the bottling of noncarbonated beverages using artificial neural networks," *Food Bioprod. Process.*, vol. 128, pp. 63–76, 2021.
- [20] A. D. Rincón-Quintero *et al.*, "Manufacture of hybrid pieces using recycled R-PET, polypropylene PP and cocoa pod husks ash CPHA, by pneumatic injection controlled with LabVIEW Software and Arduino Hardware," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 844, no. 1, 2020.
- [21] A. N. Abubakar, S. L. Dhar, A. A. Tijjani, A. M. Abdullahi, "Automated liquid filling system with a robotic arm conveyor for small scale industries," *Mater. Today Proc.*, 2021.
- [22] S. Wibowo, T. Grauwet, G. B. Gedefa, M. Hendrickx, A. Van Loey, "Quality changes of pasteurised mango juice during storage. Part II: Kinetic modelling of the shelf-life markers," *Food Res. Int.*, vol. 78, pp. 410–423, 2015.
- [23] T. Voigt, S. Flad, P. Struss, "Model-based fault localization in bottling plants," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, no. 1, pp. 101–114, 2015.
- [24] Y. Zhao, X. An, N. Sun, "Virtual simulation experiment of the design and manufacture of a beer bottle-defect detection system," *Virtual Real. Intell. Hardw.*, vol. 2, no. 4, pp. 354–367, 2020.
- [25] Y.-R. Wu, W.-H. Hsu, "A general mathematical model for continuous generating machining of screw rotors with worm-shaped tools," *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 1, pp. 28–37, 2014.
- [26] Z. Balajti, J. Ábel, I. Dudás, "Examination for post-sharpening adjustment of cutting edge of a worm gear hob with circle arched profile in axial section," *Procedia Manuf.*, vol. 55, pp. 260–265, 2021.
- [27] B. Huang *et al.*, "Research and implementation of machine vision technologies for empty bottle inspection systems," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 1, pp. 159–169, 2018.
- [28] K. S. Kiangala, Z. Wang, "An Industry 4.0 approach to develop auto parameter configuration of a bottling process in a small to medium scale industry using PLC and SCADA," *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 725–730, 2019.
- [29] M. Azamfar, X. Jia, V. Pandhare, J. Singh, H. Davari, J. Lee, "Detection and diagnosis of bottle capping failures based on motor current signature analysis," *Procedia Manuf.*, vol. 34, pp. 840–846, 2019.

## Evaluación de la incidencia de la geometría del área de reflexión en el rendimiento óptico de un prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico

Evaluation of the incidence of the geometry of the reflection area in the optical performance of a handmade prototype of a parabolic trough concentrator

Brayan Eduardo Tarazona-Romero<sup>1</sup>, Javier Gonzalo Ascanio-Villabona<sup>2</sup>  
Camilo Leonardo Sandoval-Rodriguez<sup>3</sup>, Arly Dario Rincon-Quintero<sup>4</sup>

Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA | Universidad del País Vasco UPV-EHU, ESPAÑA

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-6099-0921> | [btarazona@correo.uts.edu.co](mailto:btarazona@correo.uts.edu.co) - [btarazona001@ikasle.ehu.eus](mailto:btarazona001@ikasle.ehu.eus)

Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-1749-5399> | [jascanio@correo.uts.edu.co](mailto:jascanio@correo.uts.edu.co)

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-8584-0137> | [csandoval@correo.uts.edu.co](mailto:csandoval@correo.uts.edu.co)

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-4479-5613> | [arincon@correo.uts.edu.co](mailto:arincon@correo.uts.edu.co)

Recibido 13-01-2022, aceptado 21-02-2022

### Resumen

Este artículo tiene como objeto evaluar la incidencia de la geometría del área de reflexión en el rendimiento óptico de un sistema a baja escala de concentrados cilindro-parabólico. El sistema fue desarrollado y probado para calentar agua o generar vapor de agua en las Unidades Tecnológicas de Santander, ubicadas en Bucaramanga, Colombia. Se tuvieron en cuenta factores ópticos del prototipo real para realizar un análisis de trazado de rayos de monte Carlo, aplicando la Herramienta SolTrace. El sistema de concentración real fue sometido a una comparación con dos sistemas geoméricamente diferentes, es decir, un concentrador con dimensiones inferiores al sistema real y uno con dimensiones mayores, con el fin de determinar los rendimientos ópticos y las relaciones de concentración, para determinar la relación existente entre estos dos parámetros y el rendimiento de la unidad. Los resultados obtenidos, mostraron que el área de reflexión afecta directamente el rendimiento óptico y la relación de concentración del dispositivo, evidenciando que, a mayor área de concentración, mayor rendimiento del equipo.

**Palabras clave:** trazado de rayos de Monte Carlo, rendimiento óptico, colectores cilindro-parabólicos, SolTrace, razón de concentración.

### Abstract

This article aims to evaluate the incidence of the geometry of the reflection area on the optical performance of a small-scale system of parabolic trough concentrates. The system was developed and tested to heat water or generate steam in the Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Colombia. Optical factors from the actual prototype were taken into account to perform a Monte Carlo ray tracing analysis, applying the SolTrace Tool. The real concentration system was subjected to a comparison with two geometrically different systems; a concentrator with dimensions smaller than the real system and one with larger dimensions. These were used to determine the optical performance and concentration ratios, to determine the relationship between these two parameters and the performance of the unit. The results obtained showed that the reflection area directly affects the optical performance and the concentration evidence of the device.

**Index terms:** Monte Carlo ray tracing, optical performance, parabolic-prough collectors, SolTrace, concentration ratio.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración solar (CSP) son una tecnología que aprovecha la radiación solar normal directa (DNI) a través de reflectores para proporcionar calor de alta intensidad a ciclos de energía convencionales [1]. Son sistemas aplicados de forma centralizada para la producción de energía eléctrica o energía térmica [2]. Tecnológicamente se pueden clasificar en cuatro tipos de sistemas [3]: colectores cilindro-parabólicos (PTC)[4], colectores lineales Fresnel (LFC) [5]-[6], disco parabólico (PD) [7] y torre de concentración (CT) [8], [9]. Las Tecnologías PTC y LFC se conocen como sistemas lineales o 2D y manejan temperaturas medias con trabajo en rangos de 100°C a 500°C [10]. Por su parte, la tecnología PD y CT son sistema de concentración puntual o 3D y alcanzan temperaturas mayores a los 1000°C [11].

Los colectores cilindro-parabólico (PTC), actualmente son la tecnología de concentración solar (CSP) [10] [12] con mayor madurez y aplicación a nivel mundial [13], [14]. El sistema está compuesto por un área de reflexión solar, generalmente constituidas por espejos altamente reflectantes que direccionan los rayos solares a un punto focal o superficie de concentración [15]. El sistema transfiere calor a un fluido caloportador, aprovechando la radiación solar. Generalmente, cuentan con un sistema auxiliar de bombeo y de seguimiento solar en un solo eje, para garantizar que el dispositivo en posición perpendicular al sol todo el día [16], [17].

El costo comercial de estos dispositivos es de aproximadamente 275 euros en sistemas centralizados [18], [19], esto los hace todavía altamente costosos para aplicaciones a baja escala [20], [21]. Consecuentemente, en los últimos años diferentes autores han centrado su aplicación a sistemas PTC con diseños con materiales alternativos a baja escala o artesanales, con el fin de desarrollar tecnologías alternativas a los sistemas comerciales, sacrificando eficiencia a cambio de reducción de costos y fácil operación para aplicarlos en zonas aisladas; con alto potencial de radiación solar, pero con carencia de recursos económicos [22], [23]. Este tipo de desarrollos tecnológicos van acompañados de análisis ópticos y térmicos [24], por medio de métodos de como [25] [26]: trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) [27], [28], simulaciones numéricas [29], [30] y modelados CFD [31], [32]. Destacando el método MTCR por su precisión y simplicidad en la aplicación de los software construidos para su desarrollo, sobre los otros dos métodos [33], [34].

Eventualmente, el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía y Automatización Industrial (GISEAC) de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) desarrolló un prototipo artesanal de colector cilindro-parabólico basado en materiales blandos y lo evaluó de forma experimental [5]. El dispositivo presentó eficiencias bajas, debido a que se fabricó bajo el concepto de tecnología apropiada, dando prioridad al uso de recursos locales y mano de obra local para su construcción, incurriendo en un sistema a bajo costo [10].

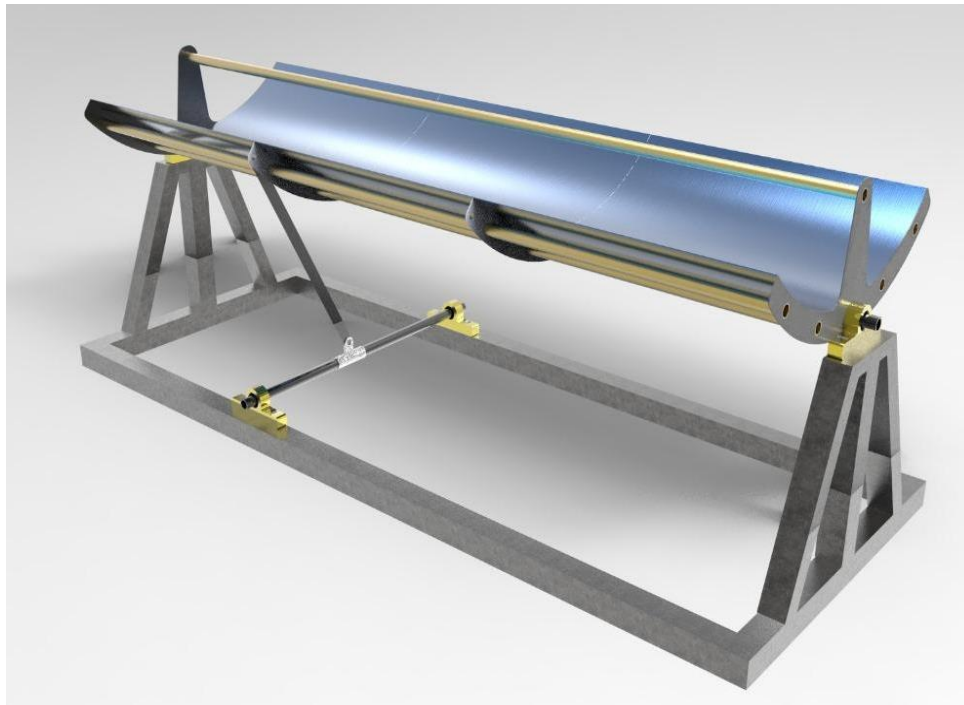
Finalmente, el presente trabajo busca analizar de forma óptica el rendimiento del dispositivo aplicando el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) por medio del software SolTrace, evaluando la geometría del sistema actual y unas variaciones del área de reflexión. Consecuentemente, la sección 2 presenta los métodos y materiales utilizados para el desarrollo de las simulaciones, incluyendo características del prototipo real y las variaciones geométricas a simular. La sección 3 presenta los resultados obtenidos del proceso de simulación y, por último, la sección 4 describe las principales conclusiones del desarrollo del trabajo.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Prototipo concentrador cilindro-parabólico

Las dimensiones y las características ópticas del prototipo PTC se presentan en la Tabla 1. El prototipo actual se basa en tres componentes principales (véase Fig. 1):

- Área de reflexión
- Tubo receptor
- Sistema de seguimiento solar



**Fig. 1.** Prototipo artesanal de concentrador cilindro-parabólico.

La información presentada en la Tabla 1 es necesaria para el desarrollo de modelo óptico del dispositivo y la construcción del modelo 3D en el software de simulación, ya que permite alimentar la herramienta SolTrace valores reales del sistema, con el fin de efectuar un análisis óptico fiable, aplicando la metodología de trazado de rayos de Monte Carlo (MTCR) [35].

TABLA 1  
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ÓPTICAS DEL PROTOTIPO PTC

Variable	
$\psi$ Angulo de Borde	90°
.a (ancho de apertura)	550,08 (0,55 m)
.l (longitud del colector)	1700 mm (1,7 m)
.f (distancia focal)	164,48 mm
De (diámetro externo del tubo receptor)	15,87 mm
Di (diámetro interno del tubo receptor)	13,85 mm
Aa (área de apertura del colector)	0,935 m <sup>2</sup>
Ar (área del tubo receptor)	0.04985 m <sup>2</sup>
Co (razón de concentración)	11,85 mm
Emisividad de la pintura negra	0,98
Absortividad solar pintura Negra	0,98

### B. Modelo óptico

La evaluación del rendimiento óptico y térmico de los sistemas de concentración solar cilindro-parabólico, requiere ecuaciones matemáticas de alta precisión, basados en predicciones para analizar los coeficientes ópticos. La determinación de la eficiencia óptica para sistemas PTC depende de factores significativos como: errores en el área de reflexión, el Angulo de incidencia, perdidas por sombras y la razón de concentración.

En consecuencia, los modelos ópticos se aplican para determinar la intensidad en la distribución de rayos solares o radiación normal directa (DNI) en el área de reflexión y la superficie de concentración. Este análisis óptico, incluye las dimensiones del sistema actual PTC y se analizara aplicando un software de acceso abierto SolTrace, ampliamente aplicado a nivel mundial:

- Soltrace (<https://www.nrel.gov/csp/soltrace-download.html>): es una herramienta basada en el método de Trazado de Rayos de monte Carlo, desarrollada en un código C++. Requiere el uso de un plugin llamado Google Sketchup, para desarrollar un diseño 3D del prototipo a analizar, para alimentar directamente SolTrace.

4

A su vez, la Tabla 2 presenta las geometrías a simular con el fin de identificar el rendimiento óptico del sistema actual, así como dos propuestas de variación geométrica donde una presenta área de concentración mayor y otra menor. Las propuestas de variación del área se hacen con base en la disponibilidad de material en la zona local de implementación, determinando las características propias de cada material reflector, así como sus dimensiones y la opción de modificación a futuro del sistema real. El análisis actual permitirá identificar la incidencia del área de reflexión en el rendimiento del prototipo PTC.

TABLA 2  
GEOMETRÍA DE LAS SIMULACIONES A REALIZAR

Geometría	Ancho Lamina Área de Reflexión (mm)	Angulo	Ancho Apertura (m <sup>2</sup> )	Distancia Focal (m)
Real	609	90	0,454287	0,132975
1	400	90	0,289382	0,0847
2	800	90	0,596765	0,17468

Adicionalmente, se requieren expresiones matemáticas para determinar el rendimiento óptico del prototipo artesanal PTC a partir de las intensidades de flujo entregadas por el proceso de simulación en SolTrace. Para este proceso se puede aplicar la ecuación 1 [35], [36]:

$$\eta_{spp} = \eta_{sf} * \eta_{rec} * \eta_{pb} \quad (1)$$

$\eta_{spp}$  = Rendimiento del sistema de concentración solar o PTC

$\eta_{sf}$  = Rendimiento área de reflexión

$\eta_{rec}$  = Rendimiento del receptor

$\eta_{pb}$  = Rendimiento del bloque de potencia

Por otro lado, la variación del rendimiento del sistema PTC se determina a partir del rendimiento óptico del área de reflexión (véase ecuación 2). El rendimiento del receptor y el bloque de energía permanecen constantes para el análisis [35], [36].

$$\eta_{sf} = \frac{Q * A_{rec}}{DNI * A_{sf}} \quad (2)$$

$Q$  = Flujo medio generado por el área de reflexión

$A_{rec}$  = Área tubo receptor

$A_{sf}$  = Área de reflexión

DNI = Radiación normal directa



Finalmente, para determinar la razón de concentración (CR), se aplica la ecuación 3 [35], [36]:

$$CR = \frac{\text{Número de rayos concentrados en el receptor}}{\text{Numero de rayos totales concentrados en el area de ref.}} \quad (3)$$

### C. Características meteorológicas simuladas

- El uso de SolTrace permitirá evaluar condiciones meteorológicas, que inciden directamente en variables determinantes para el rendimiento del dispositivo como: el flujo de calor y la distribución de rayos solares o DNI.

El sistema PTC real se encuentra en las Unidades Tocológicas de Santander (UTS) con las siguientes características:

Latitud: 7° 6' 16.326" N, 7.1045351

Longitud: 73° 7' 25.134" W, -73.1236482

Estas coordenadas se identifican por medio del sitio Web Sun Earth Tools como se presenta en la Fig. 2 y permite tener un estimado del DNI.

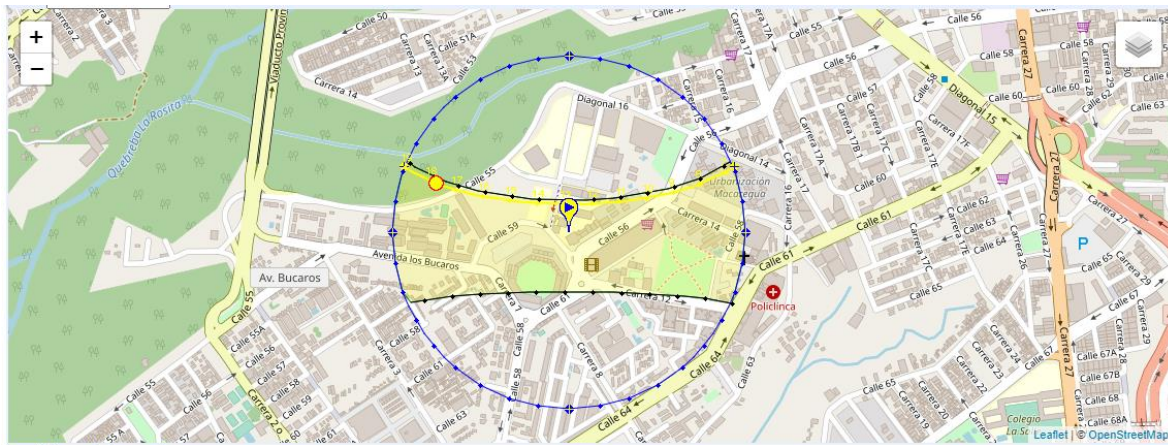


Fig. 2. Ubicación geográfica UTS para simulación en SolTrace.

Finalmente, la simulación en SolTrace se desarrollará para un DNI fijo de 600 W/m<sup>2</sup> basado en la información encontrada en Sun Earth Tools y el análisis efectuado por Saavedra-Quintero y Sánchez-Martínez en el 2021 [37]. Así mismo, se simulará con una intensidad de 5 000 000 de rayos; el valor de intensidad de rayos, fue determinado con base en las recomendaciones que hace el autor del software, donde indica que, a mayor cantidad de rayos en el análisis, mayor tiempo tomará la simulación, pero mejores resultados en términos de exactitud y precisión tendrá.

Adicionalmente, en el sitio web Sun Earth Tools, se determinó la posición solar para los intervalos diarios del día durante cada hora, con el fin de determinar la posición del sistema PTC a simular respecto al Sol. Con este parámetro, se garantiza que el proceso de simulación se realice con características reales de operación del sistema. La Fig. 3 presenta la Carta Solar de la Ubicación en las Unidades Tecnológicas de Santander, con la que se pudo determinar el ángulo del PTC respecto a la ubicación solar (véase Tabla 3).

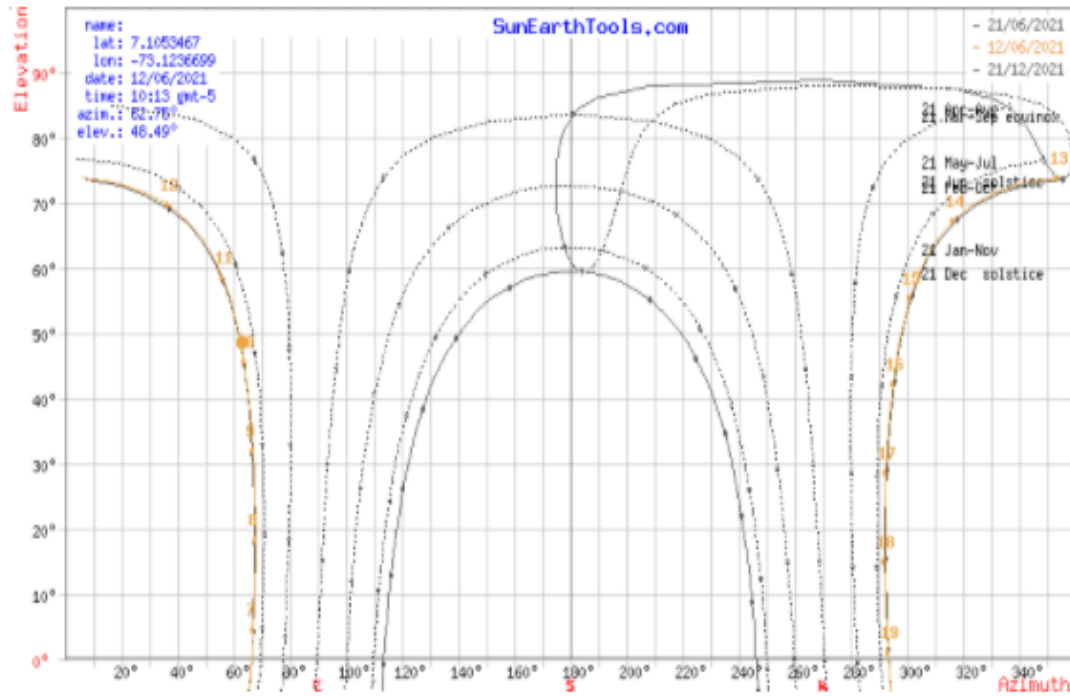


Fig. 3. Representación cartesiana posición solar.

TABLA 3  
POSICIÓN SOLAR UTS

Ubicación	Ángulo	
	7.105	-73.123
hora	elevación	azimut
6:36:31	-0.833°	66.52°
7:00:00	4.52°	67.17°
8:00:00	18.28°	67.88°
9:00:00	32.04°	67.05°
10:00:00	45.61°	63.91°
11:00:00	58.56°	56.16°
12:00:00	69.56°	36.69°
13:00:00	73.81°	353.80°
14:00:00	67.15°	316.59°
15:00:00	55.41°	301.23°
16:00:00	42.24°	295.03°
17:00:00	28.60°	292.60°
18:00:00	14.83°	292.19°
19:00:00	1.09°	293.25°



### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de simulación se realizó para las tres geometrías diferentes a través de la herramienta SolTrace como se evidencia en la Fig. 4, teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 1 y 2. La Fig. 4A presenta el trazado de rayos en el software SolTrace del PTC real, así como la Fig. 4B el PTC con un área de reflexión mayor y la Fig. 4C el PTC con un área de reflexión menor.

7

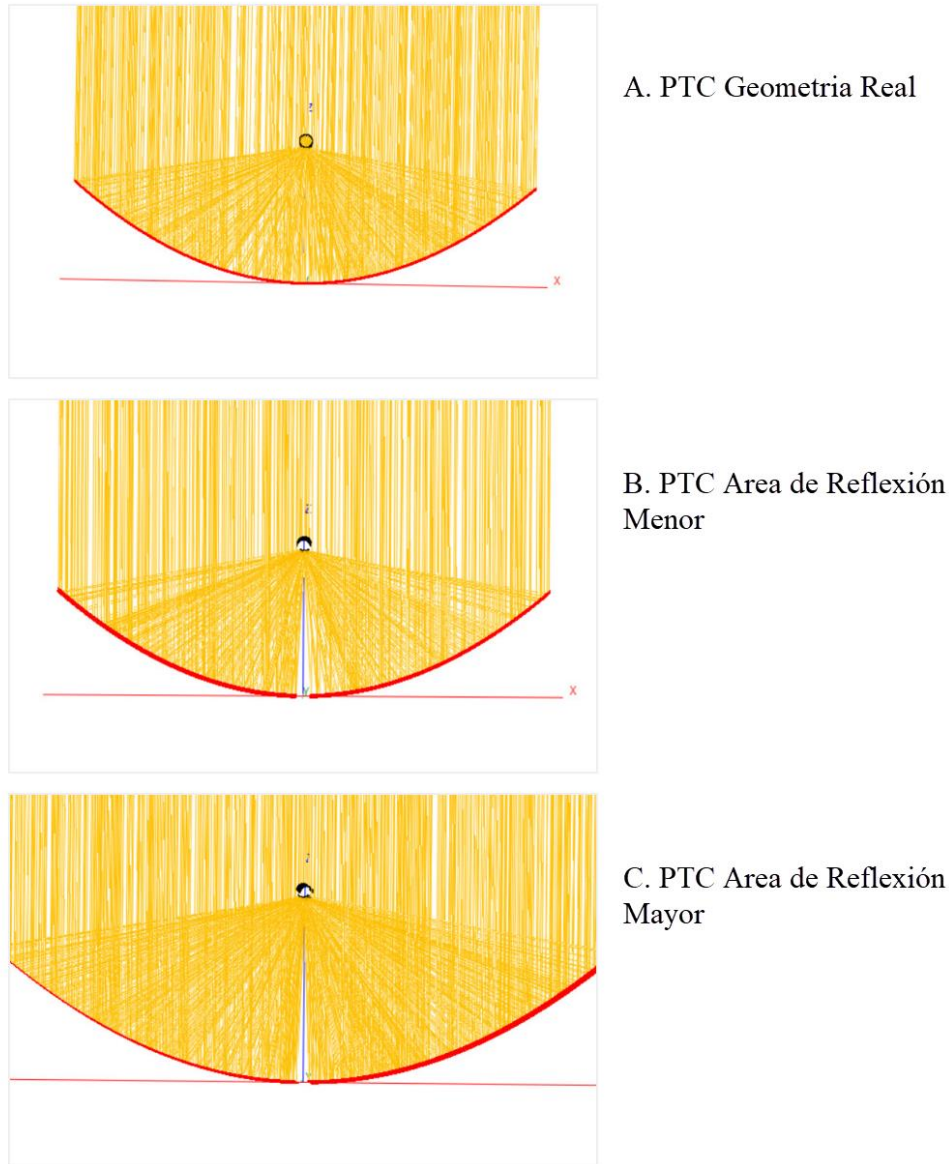


Fig. 4. Gráficas de trazado de rayos PTC en SolTrace.

La Fig. 5 presenta de forma gráfica las intensidades de flujo presentadas en la Tabla 4. Este tipo de diagramas permite evidenciar la intensidad de los rayos que inciden en las superficies evaluadas. La Fig. 5A representa la

intensidad de flujo en el tubo receptor y la Fig. 5B la intensidad de flujo en el tubo área de reflexión primaria para el PTC real. De igual forma, la Fig. 5C y 5D lo hacen para el PTC con mayor área de Reflexión y la Fig. 5E y 5F lo hacen para el PTC con menor área de reflexión.

8

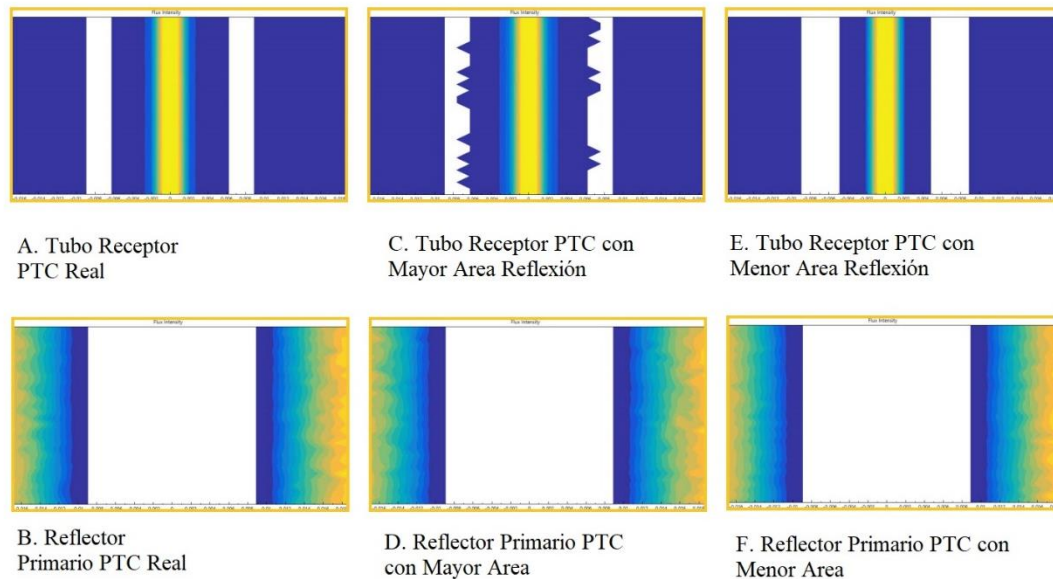


Fig. 5. Intensidad de flujo de trazado de rayos en SolTrace.

Por su parte, la Tabla 4 presenta la información de eficiencia óptica y razón de concentración, así como la intensidad de flujo del área de reflexión y el tubo absorbedor. Esta última información, es producto de la aplicación del método de trazado de rayos de Monte Carlo a través de la herramienta SolTrace para cada una de las geometrías planteadas.

Los valores de eficiencia óptica son producto de aplicar las ecuaciones 1 y 2, así como las características geométricas de los PTC presentados en la Tabla 2. Por su parte, la razón de concentración se determinó a través de la aplicación de la ecuación 3 y los datos de intensidad de flujo del área de reflexión y el tubo absorbedor.

TABLA 4  
RESULTADOS DE EFICIENCIA ÓPTICA Y RAZÓN DE CONCENTRACIÓN

Geometría	Intensidad Flujo		Eficiencia Óptica %	Razón concentración %
	Tubo Absorbedor	Superficie Reflectora		
Real	62531,9	689,987	12,12	94,54
Menor	52183,8	644,671	11,78	80,94
Mayor	69311,8	715,322	13,07	96,89

La Fig. 6 presenta gráficamente el rendimiento óptico de los PTC evaluados y se nota una tendencia a aumentar cuando el área de reflexión es mayor y el rendimiento disminuye cuando el área de reflexión es menor. Es importante destacar, que el aumento de la eficiencia es apenas del 1%, sin embargo, es significativo para contribuir en la mejora del sistema PTC real.

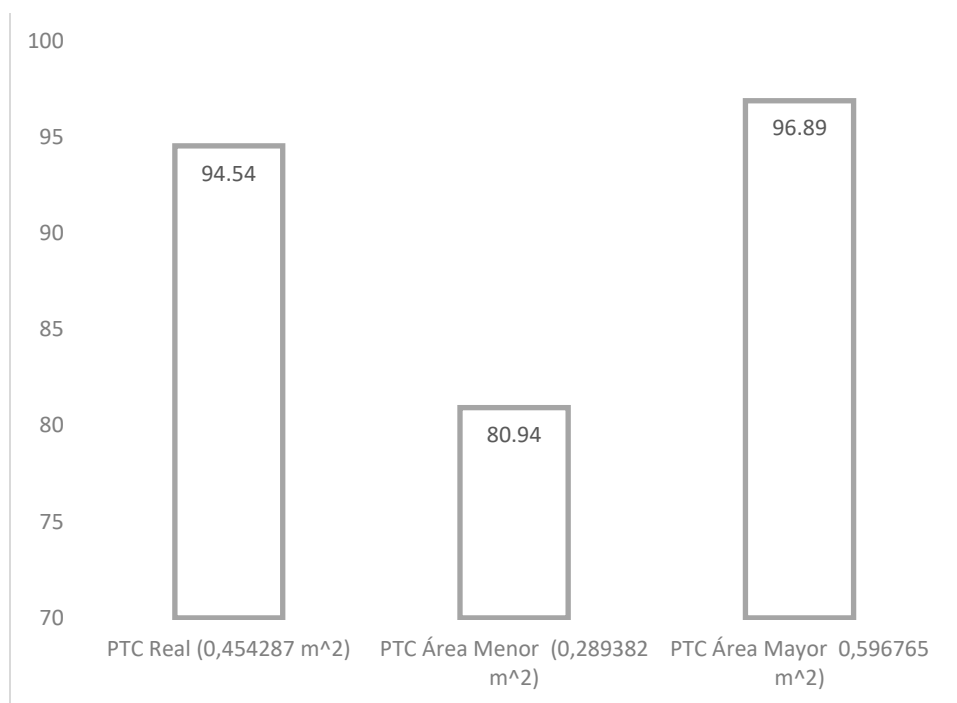


Fig. 6. Gráficas de eficiencia con base en las simulaciones de los sistemas de concentración cilindro-parabólico.

Finalmente, la Fig. 7 presenta la relación de concentración de los PTC evaluados y se evidencia un leve aumento cuando el área de reflexión es mayor y una tendencia por debajo de la razón de concentración con el PTC real, cuando el sistema tiene un área de reflexión primaria menor.

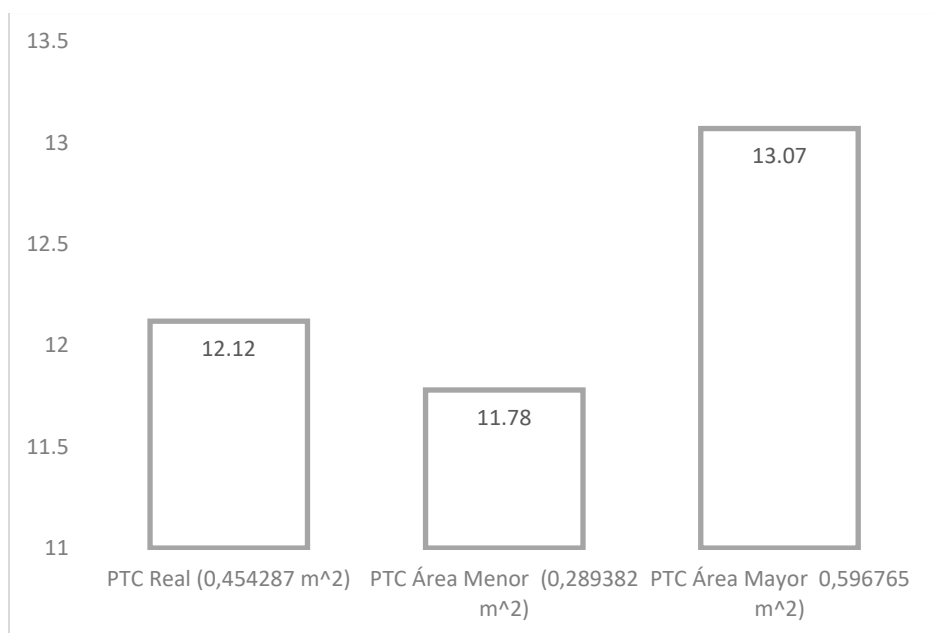


Fig. 7. Gráficas de relación de la concentración con base en las simulaciones de los sistemas de concentración cilindro-parabólico.

#### IV. CONCLUSIONES

La aplicación de sistemas de concentración solar en todo el mundo, a nivel centralizado y descentralizado en áreas residenciales e industriales, ha tenido crecimiento en los últimos años y, actualmente, se encuentra aún en desarrollo e investigaciones día a día. Dentro de la clasificación de sistemas de concentración solar, se destacan los colectores cilindro-parabólicos por presentar facilidad en el mantenimiento, modularidad, costo de inversión, manufactura, entre otros. Esto motivo al grupo de investigación en energía, sistemas de automatización y control GISEAC, para fabricar un prototipo artesanal de este tipo de concentrador en las instalaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, como una alternativa para la producción de agua o vapor de agua. Para estudiar el comportamiento óptico del prototipo artesanal actual, se realiza un estudio óptico aplicando el software SolTrace, comparando el dispositivo real con una serie de variaciones geométricas con el fin de determinar la implicación del área de reflexión en el rendimiento del dispositivo. En conclusión, los resultados más importantes logrados en el presente estudio son:

- El rendimiento óptico del PTC aumenta proporcionalmente respecto al aumento en el área de reflexión. Para el PTC real, el área de reflexión fue de 0,454287 m<sup>2</sup> y el rendimiento óptico del 12,12%. Por su parte, el dispositivo con una mayor área de reflexión (0,596765 m<sup>2</sup>) presentó un rendimiento óptico del 13,07%, mientras que para el sistema con un área de reflexión inferior al sistema PTC real (0,289382 m<sup>2</sup>) evidencia un rendimiento óptico del 11,78%.
- La razón de concentración del PTC con un área de reflexión mayor fue del 96,68%, evidenciando un aumento en menor proporción respecto al sistema real que fue del 94,54%. Por su parte, el PTC con menor área de reflexión, presentó una razón de concentración de tan solo el 80,94 %, por debajo de los valores del PTC real y del PTC con mayor área.
- Adicionalmente, este estudio ha permitido evaluar la relación directa entre el rendimiento óptico del sistema de concentración cilindro-parabólico y la razón de concentración, determinando en el estudio de caso que: a mayor área de reflexión, mayor será el rendimiento del sistema.
- Se requiere realizar un análisis experimental modificando el área de reflexión del dispositivo actual para contrastar los datos obtenidos por la simulación.

Finalmente, se identifica un escenario geométrico que aumentaría el rendimiento de la unidad actual, contribuyendo en el desarrollo de tecnologías emergentes construidas con recursos locales a bajo costo de inversión inicial. Es importante destacar, que este tipo de sistemas artesanales no buscan competir con las tecnologías comerciales, más bien aprovechan la experiencia comercial para ofrecer una alternativa energética para zonas aisladas con carencia de recursos económicos, problemas sociales y carencia de energía térmica, que gozan, que gozan de altos niveles de radiación solar.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS).

#### REFERENCIAS

- [1] J. J. C. S. Santos, J. C. E. Palacio, A. M. M. Reyes, M. Carvalho, A. J. R. Freire, M. A. Barone, "Chapter 12 - Concentrating Solar Power," en *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, I. Yahyaoui, Ed. Elsevier, 2018, pp. 373-402. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00012-5>
- [2] R. Pitz-Paal, "Chapter 19 - Solar Energy – Concentrating Solar Power," en *Future Energy*, 2<sup>nd</sup> ed., T. M. Letcher, Ed. Boston: Elsevier, 2014, pp. 405-431. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00019-3>
- [3] H. Price *et al.*, "Chapter 20 - Concentrating solar power best practices," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds. Woodhead Publishing, 2021, pp. 725-757. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00020-7>

- [4] E. Z. Moya, "Chapter 7 - Parabolic-trough concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds. Woodhead Publishing, 2021, pp. 219-266. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00009-8>
- [5] B. E. Tarazona-Romero, A. Campos-Celador, Y. A. Muñoz-Maldonado, J. G. Ascanio-Villabona, M. A. Duran-Sarmiento, A. D. Rincón-Quintero, "Development of a Fresnel Artisanal System for the Production of Hot Water or Steam," en *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Cham, 2021, pp. 196-209. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_15)
- [6] B. E. T. Tarazona-Romero, A. C. Celador, C. L. S. Rodríguez, J. G. A. Villabona, A. D. R. Quintero, "Design and construction of a solar tracking system for Linear Fresnel Concentrator," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, n.º 4, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.21533/pen.v9i4.1988>
- [7] W. Schiel, T. Keck, "Chapter 9 - Parabolic dish concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 311-355. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00007-4>
- [8] L. L. Vant-Hull, "Chapter 8 - Central tower concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 267-310. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00019-0>
- [9] W.-D. Steinmann, C. Prieto, "24 - Thermal storage for concentrating solar power plants," en *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 2<sup>nd</sup> ed., L. F. Cabeza, Ed., Woodhead Publishing, 2021, pp. 673-697. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00024-3>
- [10] B. E. Tarazona-Romero, Á. Campos-Celador, Y. A. Muñoz-Maldonado, C. L. Sandoval-Rodríguez, J. G. Ascanio-Villabona, "Prototype of lineal solar collector Fresnel: Artesanal system for the production of hot water and/or water vapor," *Visión electrónica*, vol. 14, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.14483/22484728.16013>
- [11] A. Khosravi, M. Malekan, J. J. G. Pabon, M. E. H. Assad, "Chapter 5 - Solar power tower system," en *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*, M. E. H. Assad y M. A. Rosen, Eds. Academic Press, 2021, pp. 61-83. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00006-7>
- [12] A. Häberle, D. Krüger, "Chapter 18 - Concentrating solar technologies for industrial process heat," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 659-675. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00011-6>
- [13] K. Lovegrove, J. Pye, "Chapter 2 - Fundamental principles of concentrating solar power systems," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 19-71. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00013-X>
- [14] K. Lovegrove, W. Stein, "Chapter 1 - Introduction to concentrating solar power technology," en *Concentrating Solar Power Technology*, 2<sup>nd</sup> ed., K. Lovegrove y W. Stein, Eds., Woodhead Publishing, 2021, pp. 3-17. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00012-8>
- [15] M. Malekan, A. Khosravi, M. El Haj Assad, "Chapter 6 - Parabolic trough solar collectors," en *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*, M. E. H. Assad y M. A. Rosen, Eds. Academic Press, 2021, pp. 85-100. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00007-9>
- [16] B. E. Tarazona-Romero, A. Campos-Celador, Y. A. Maldonado-Muñoz, "Can solar desalination be small and beautiful? A critical review of existing technology under the appropriate technology paradigm," *Energy Research & Social Science*, vol. 88, p. 102510, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102510>
- [17] H. Parlamiş, E. Özden, M. S. Büker, "Experimental performance analysis of a parabolic trough solar air collector with helical-screw tape insert: A comparative study," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, pp. 101-156, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101562>
- [18] K. Mohammadi, S. Khanmohammadi, J. Immonen, K. Powell, "Techno-economic analysis and environmental benefits of solar industrial process heating based on parabolic trough collectors," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101412, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101412>
- [19] J. Fredriksson, M. Eickhoff, L. Giese, y M. Herzog, «A comparison and evaluation of innovative parabolic trough collector concepts for large-scale application», *Solar Energy*, vol. 215, pp. 266-310, feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.017>
- [20] T. K. Aseri, C. Sharma, T. C. Kandpal, "Cost reduction potential in parabolic trough collector based CSP plants: A case study for India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110658, mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110658>
- [21] B. H. Upadhyay *et al.*, "Design, development and techno economic analysis of novel parabolic trough collector for low-temperature water heating applications," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 26, p. 100978, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100978>
- [22] P. P. Dutta *et al.*, "Modeling and performance evaluation of a small solar parabolic trough collector (PTC) for possible purification of drained water," *Materials Today: Proceedings*, may 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.489>
- [23] S. M. Sadegh Hosseini, M. S. Dehaj, "An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and GO/water nanofluids," *Energy*, vol. 234, p. 121317, nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121317>

- [24] B. E. Tarazona-Romero, Y. A. M. Maldonado, A. C. Celador, O. L. Pérez, "Optical Performance Assessment of a Handmade Prototype of Linear Fresnel Concentrator," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, n.º 4, Art. n.º 4, oct. 2021, doi: <https://doi.org/0.21533/pen.v9i4.1987>
- [25] A. Malan, K. Ravi Kumar, "A comprehensive review on optical analysis of parabolic trough solar collector," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101305, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101305>
- [26] R. Siva Subramanian, G. Kumaresan, R. Palanivel, P. Nishanth kalathil, B. Nirmal, "Comparative performance analysis of parabolic trough solar collector by varying absorber surface," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 1217-1221, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.248>
- [27] A. Gowda, S. Dassappa, R. Hanumanthappa, "Theoretical prediction of solar heat flux intensity on parabolic trough collector systems," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2231-2236, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.484>
- [28] A. K. Ramasamy, M. Ganesh, K. Rajamani, A. K. Loganathan, R. Rangaswamy, "Investigation of concentrated solar collector with discretized flat mirrors in parabolic arrangement," *Energy for Sustainable Development*, vol. 64, pp. 25-34, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.005>
- [29] S. Wu, R. Tang, C. Wang, "Numerical calculation of the intercept factor for parabolic trough solar collector with secondary mirror," *Energy*, vol. 233, p. 121175, oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121175>
- [30] F. I. Nascimento, E. W. Zavaleta-Aguilar, J. R. Simões-Moreira, "Algorithm for sizing parabolic-trough solar collectors," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 24, p. 100932, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100932>
- [31] S. E. Ghasemi, A. A. Ranjbar, "Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 222, pp. 159-166, oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.091>
- [32] S. Marrakchi, Z. Leemrani, H. Asselman, A. Aoukili, A. Asselman, "Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using CFD," *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 773-779, ene. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.110>
- [33] N. Kincaid, G. Mungas, N. Kramer, M. Wagner, G. Zhu, "An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver," *Applied Energy*, vol. 231, pp. 1109-1121, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.153>
- [34] W. Peng, O. K. Sadaghiani, "Geometrical variation in receiver tube of SEGS LS-2 parabolic trough collector (PTC) based on heat flux distribution to improve the thermal performance," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, p. 106858, may 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106858>
- [35] J. González Martínez, Y. C. Villabona Niño, "Análisis óptico y térmico de un prototipo de colector de concentración solar lineal cilíndrico parabólico, aplicando los softwares Soltrace-Tonatiuh con el fin de identificar y definir mejoras en el diseño geométrico del modelo," ago. 2021, Accedido: 1 de febrero de 2022. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7228>
- [36] A. R. Arenas García, J. C. Jaimes Orostegui, "Evaluación óptica y térmica de un prototipo de colector de concentración solar lineal cilíndrico parabólico (CSP), aplicando los softwares SOLTRACE y TRNSYS," nov. 2021, Accedido: 1 de febrero de 2022. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7821>
- [37] L. F. Saavedra Quintero, D. F. Sánchez Martínez, "Automatización de un sistema de seguimiento solar en un eje para un prototipo de colector lineal tipo Fresnel de las Unidades Tecnológicas de Santander," abr. 2021, Accedido: 27 de septiembre de 2021. [online]. Disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5828>



## Truck Chassis Design and Analysis

Diseño y análisis del chasis para camiones

João Batista De Aguiar<sup>1</sup>, José Manoel De Aguiar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do ABC, BRASIL

<https://orcid.org/0000-0002-1210-1242> | [joao.aguiar@ufabc.edu.br](mailto:joao.aguiar@ufabc.edu.br)

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia de São Paulo, BRASIL

<https://orcid.org/0000-0003-4371-3572> | [josemaguiar@gmail.com](mailto:josemaguiar@gmail.com)

Recibido 13-01-2022, aceptado 31-01-2022

### Abstract

Commercial trucks of medium size are nowadays object of redesign of their structural system in the intent of increasing size or load capacity. The chassis is an essential element in this task. Many times, while keeping the front and rear overhangs of the chassis fixed, the inter-wheel distance is increased, sometimes with inclusion of an additional shaft, to allow that larger load containers with more capacity be used. Reconfigured geometrically, it has to support static and dynamic loads. In this sense a model of the ladder type chassis, post initial design, is submitted to alterations. Geometry, materials and loading are considered in a design method for hyperstatic conditions. Response of the model, using the finite element method, is presented to characterize diverse loadings. A set of critical sections is observed. Based upon the obtained results, the adequacy of the implemented method is verified.

**Index terms:** ladder chassis frame, modification, design, finite element analysis, results.

### Resumen

Camiones comerciales de tamaño mediano suelen ser objeto de rediseño de su sistema estructural con el objetivo de aumentar tamaño o capacidad, el chasis es un elemento esencial en esta tarea. Muchas veces mientras se mantiene el tamaño de las partes delantera y trasera del chasis fijas, la distancia entre ejes es aumentada, incluso con la inclusión de eje adicional, para que contenedores mayores con más carga sean usados. Reconfigurado geométricamente el chasis debe soportar cargas estáticas y dinámicas. En ese sentido un modelo de chasis tipo escalera, posdiseño inicial, es sometido a alteraciones. La geometría, materiales y cargamento son considerados en uno método de diseño para condiciones hiperestáticas. La respuesta del modelo, utilizando el método del elemento finito, es presentada para su análisis en condiciones diversas de carga. Se observó un conjunto de secciones crítica y con base en los resultados obtenidos se realizó una adecuación de la solución propuesta.

**Palabras clave:** chasis tipo escalera, modificación, diseño, análisis por elemento finito, resultados.



## I. INTRODUCTION

The chassis is the most important structural part of transportation vehicles, such as trucks. It holds the cabin, the container and its load. Its frame provides the points for the engine and gearbox, the suspension, the steering mechanism, power shaft, differential and axle assemblies as well as braking system [1]. It also holds compartments for accessories such as fuel, water and lubricant tanks, the kerb or empty weight. The chassis system is also a fundamental part of the resistance against impact, having to carry large loads in secure and stable conditions even in uneven roads. Its endurance has to be large to allow a large life in service.

Geometry of chassis systems is diverse. The ladder type frame is one of the oldest forms of chassis, being the mostly used, in part due to its versatility and reliability. These chassis are composed of two long channel beams held a part by a set of transverse elements. Design of the chassis takes into account flexural resistance in both planes – longitudinal and lateral - plus torsional resistance. Sizing may consider short, medium and large versions. In this last scenario, extension to comport longer load containers and or higher loads is sought, sometimes including the addition of an intermediate axle with concomitant extension of the chassis. Dimensioning and analysis in this situation is considered here.

Literature in chassis design includes diverse conditions. Chassis design and analysis for different combinations of cross sections [2] is one of the approaches. Optimization for weight reduction [3] is another. Finite element analysis is commonly used in these solutions.

## II. HYPERSTATIC CHASSIS DESIGN

A design method for basic dimensioning of a chassis, set the arrangement, loading and chosen the material for the construction was presented previously [4]. From the procedure, profile and sectional modulae of the structural elements are determined, allowing the use of some fixed sections for the three versions of the chassis. Some restrictions have to be imposed in the process, as a maximum value of the load per wheel, maximum front and rear free spans, total length of the chassis as well as maximum traction per shaft may be ruled by authorities. In these circumstances, the chassis capacity is never plenty and another arrangement has to be considered. Normally inclusion of another shaft in the span between rear and front wheels is considered. The new shaft may be used for transmission or not. In this case the problem becomes hyperstatic to degree one. Use of additional shafts will increase the number of unknowns in the problem.

The original chassis is composed by the frame, with added suspension elements like parabolic and elliptic springs, dampers, water lubricant and fuel tanks, spare tires and supports to additional ware. Additionally, weight of engine, cabin and transmission elements is supported by the chassis frame. The empty weight  $K$  is the sum of these weight items. The payload is  $P$ . Total vehicle weight is then  $W = P + K$ . With additional overload allowance, upper load limit becomes  $(1 + \eta)W$ . In the design scenario, static conditions are supposed [5].

Having a chassis geometry set, let us considered what happens when an additional support is included with concomitant increase of length in such a way to keep the load per unit length fixed. As a pair of longitudinal beams carries the load, if uniformly distributed loading (UDL) is supposed, load on each beam is half of this value, Fig. 1. Therefore the load per unit length  $\lambda$  will be the ratio between  $(1 + \eta)W/2$  and total length  $L$ , being the total length the sum of the front  $f$ , first inter-axis distance  $a$ , second inter-axis distance  $b$ , with the rear balance being  $r$ ,  $L = f + c + r$ ,  $c = a + b$  [6]. We suppose the front and rear balances fixed.

Equilibrium equations in the  $\langle X, Y \rangle$  plane, Eq. (1), for the vertical efforts  $\langle F, M, R \rangle$ , first, and moments about the  $Z$  axis, second, show a hyperstatic condition:

$$\begin{aligned} F + M + R &= \lambda L \\ Ma + Rc &= \lambda \left[ rc + \frac{r^2}{2} + \frac{c^2}{2} - \frac{f^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Inclusion of the relationship between the end moments  $\langle M_{fm}, M_{mf} \rangle$  and rotations  $\langle \theta_f, \theta_m \rangle$  in the first inner spans of the chassis gives additional elements to unveil one of the unknown reactions above:

$$\begin{aligned} M_{fm} &= 2EI \left[ 2 \frac{\theta_f}{a} + \frac{\theta_m}{a} \right] - \frac{\lambda a^2}{12} \\ M_{mf} &= 2EI \left[ 2 \frac{\theta_m}{a} + \frac{\theta_f}{a} \right] + \frac{\lambda a^2}{12} \end{aligned} \quad (2)$$

Analogous result may be written for the second inter-axis span:

$$\begin{aligned} M_{mr} &= 2EI \left[ 2 \frac{\theta_m}{b} + \frac{\theta_r}{b} \right] - \frac{\lambda b^2}{12} \\ M_{rm} &= 2EI \left[ 2 \frac{\theta_r}{b} + \frac{\theta_m}{b} \right] + \frac{\lambda b^2}{12} \end{aligned} \quad (3)$$

Solution now requires compatibility conditions to be observed. In the front support, shear force  $S_f = -\lambda f$  and bending moment  $M_f = -\lambda f^2 / 2$  obey:

$$\begin{aligned} F + S_{f-} &= S_{f+} \\ M_{fm} &= M_{f-} \end{aligned} \quad (4)$$

In the middle support, the shear forces at left,  $S_{m-}$  and at right,  $S_{m+}$  are related by the first equation below. Bending moments at these positions,  $M_{m-} = -M_{mf}$  and  $M_{m+} = M_{mr}$ , are related according to the second one:

$$\begin{aligned} S_{m-} + M &= S_{m+} \\ M_{mf} + M_{mr} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Finally, at the rear support, shear forces at left  $S_{r-}$  and at right, where  $S_f = \lambda r$ , may be related to the reaction  $R$  as in Eq. (6), first. Compatibility of bending moments around that support, with  $M_{r+} = -\lambda r^2 / 2$  give the other:

$$\begin{aligned} R + S_{r-} &= S_{r+} \\ M_{rm} &= M_{r+} \end{aligned} \quad (6)$$

The above set of compatibility equations may be introduced into the moment-rotation equations above, leading to the matrix-vector equation:

$$EI \begin{bmatrix} \frac{4}{a} & \frac{2}{a} & 0 \\ \frac{2}{a} & \frac{4}{a} + \frac{4}{b} & \frac{2}{b} \\ 0 & \frac{2}{b} & \frac{4}{b} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_f \\ \theta_m \\ \theta_r \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} \frac{a^2}{12} - \frac{f^2}{2} \\ \frac{b^2}{12} - \frac{a^2}{12} \\ \frac{r^2}{2} - \frac{b^2}{12} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Solution of the system of equations, supposing a non-singular matrix, leads to the elements of the vector  $\theta$ :

$$\begin{aligned} \theta_f &= \frac{a}{12EIc} [(3c+b)\lambda_f - 2b\lambda_m + b\lambda_r] \\ \theta_m &= \frac{ab}{6EIc} [-\lambda_f + 2\lambda_m - \lambda_r] \\ \theta_r &= \frac{b}{12EIc} [a\lambda_f - 2a\lambda_m + (a+3c)\lambda_r] \end{aligned} \quad (8)$$

Once the rotations above have been determined, introduction of the results into the pair of equations (2) and (3), lead to the end moments. The pair of bending moments in the first span allows determination of the shear force  $S_f$  from equilibrium of bending moments:

$$S_{r-} = -\frac{1}{b} \left[ M_{mr} + \frac{\lambda(r^2 + b^2)}{2} \right] \quad (9)$$

From the first of equations. (6), the reaction force  $R$  results. With this reaction, the pair of Eqs (1), will lead to the remaining reaction forces. The middle reaction writes as:

$$M = \frac{\lambda}{2a} [2rc + r^2 + c^2 - f^2] - \frac{Rc}{a} \quad (10)$$

being the other  $F = \lambda L - R - M$ .

The internal efforts in the first inter-axis span follows from the  $S_f$  and  $M_f$  as:

$$\begin{aligned} S(x) &= S_{f+} - \lambda x \\ M(x) &= M_{f+} + S_{f+}x - \frac{\lambda}{2} x^2 \end{aligned} \quad (11)$$

with distances  $x$  measured from the left support. Likewise, second inter-axis span may be written from shear force  $S_{m+}$ , bending moment  $M_{m+}$  and positions from left support  $x'$  in the form:

$$\begin{aligned} S(x') &= S_{m+} - \lambda x' \\ M(x') &= M_{m+} + S_{m+}x' - \frac{\lambda}{2} x'^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Shear diagrams have linear stretches, while bending moments have parabolic distribution. The extreme values may be determined from the above expressions. Critical values  $\langle S_c, M_c \rangle$  will be used to find the maximum shear and flexural stresses. As area  $A$  and bending modulus  $W$  of the chassis parts are known – analysis problem - the mean shear stress  $\tau_c = S_c / A$  and flexural stress  $\sigma_c = M_c / W$  may be computed. The corresponding factor of safety will be

$$l_{\langle \sigma, \tau \rangle} = \frac{\langle S_y, S_{sy} \rangle}{\langle \sigma_c, \tau_c \rangle},$$

being  $S_y$  and  $S_{sy}$  the yield strength – normal and shear - of the steel used in the chassis.

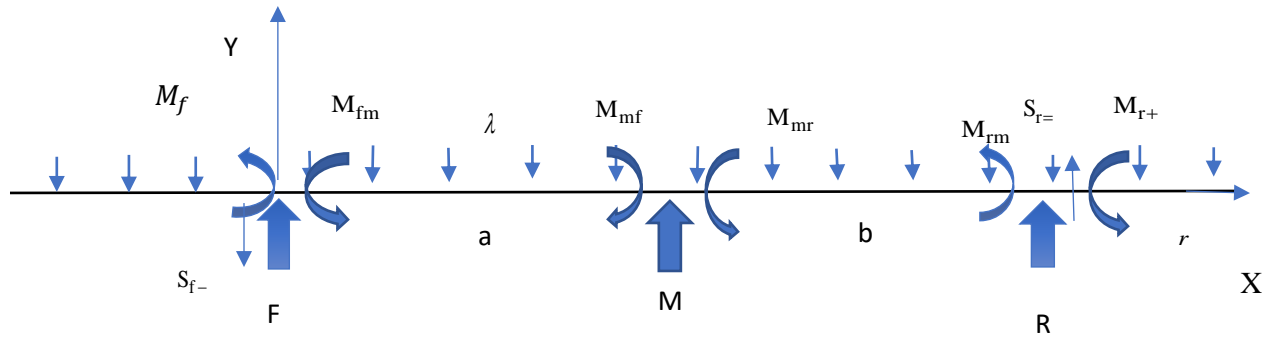


Fig. 1. Chassis beam on three supports.

### III. CHASSIS ANALYSIS

In order to analyze the chassis, the finite element method, with allowance for non-linear effects is chosen. In it the stress field in a particular configuration may be obtained by formulating equilibrium with the principle of virtual work [7], that equates internal  $\delta W_i$  and external virtual work  $\delta W_e$ , where:

$$\begin{aligned}\delta W_i &= \int_{V_t} \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\epsilon} dV; \\ \delta W_e &= \int_{V_t} \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{d} dV + \int_{S_t} \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{d} dS\end{aligned}\quad (13)$$

being  $\boldsymbol{\sigma} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{x}, t)$  and  $\boldsymbol{\epsilon} = \hat{\boldsymbol{\epsilon}}(\mathbf{x}, t)$  the true stress and linear strains at the present configuration  $\mathbf{x}$  at time  $t$ . Body forces  $\mathbf{b}$  and tractions  $\mathbf{t}$  at the present configuration work over virtual body and surface displacement fields to render the external work. Mapping the virtual work terms back to a known configuration  $\langle S_0, V_0 \rangle$  transforms virtual work terms:

5

$$\begin{aligned}\delta W_i &= \int_{V_0} \mathbf{S} : \delta \boldsymbol{\epsilon} dV_0 \\ \delta W_e &= \int_{V_0} \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{D} J_0 dV_0 + \int_{S_0} \mathbf{T} \cdot \delta \mathbf{D} I_0 dS_0\end{aligned}\quad (14)$$

Where  $\mathbf{S}$  and  $\boldsymbol{\epsilon}$  is a conjugate stress-strain pair – internal product,  $\mathbf{B}$  and  $\mathbf{T}$  - scalar product - are body and tractions obtained from the mapping into the previous configuration  $X_0$ . The displacement field is  $\mathbf{D} = D(X_0)$ ;  $J_0$  is the volumetric while  $I_0$  is the surface area ratio. Upon introducing the interpolation of the virtual displacement field,  $\mathbf{D} = \mathbf{N} \mathbf{D}^N$ , being  $\mathbf{N}$  the interpolation matrix, above expressions will turn into:

$$\begin{aligned}\delta W_i &= \delta \mathbf{D}^N \int_{V_0} \ddot{\mathbf{B}} : \mathbf{S} dV_0 \\ \delta W_e &= \delta \mathbf{D}^N \int_{V_0} \mathbf{N} \cdot \mathbf{B} J_0 dV_0 + \delta \mathbf{D}^N \int_{S_0} \mathbf{N} \cdot \mathbf{T} I_0 dS_0\end{aligned}\quad (15)$$

whose difference will then be written as:

$$\delta W_i - \delta W_e = \delta \mathbf{D}^N \boldsymbol{\Psi} \quad (16)$$

The difference between internal and external generalized forces is null for equilibrium, so  $\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{D}^N)$  becomes:

$$\boldsymbol{\Psi} = \int_{V_t} \ddot{\mathbf{B}} : \boldsymbol{\sigma} dV - \mathbf{F}; \quad \mathbf{F} = \int_{V_t} \mathbf{N} \cdot \mathbf{b} dV + \int_{S_t} \mathbf{N} \cdot \mathbf{t} dS \quad (17)$$

with mapping back to present configuration. As the generalized forces vector depends on the displacement field  $\mathbf{D}$ , problem reduces to finding this vector field, which comprises the roots of the vector equation:

$$\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{D}) = \mathbf{0} \quad (18)$$

One way to obtain a solution to this sort of equation is by using Newton's solution procedure. In order to apply it, the tangent matrix obtained from computing the increment of  $\partial \boldsymbol{\Psi}$  in terms of the increment of displacement  $\partial \mathbf{D}$  is needed. As the stress-displacement interpolation matrix consists of linear and non-linear parts, dependent upon displacements, component  $\ddot{\mathbf{B}} = \mathbf{B}_l + \mathbf{B}_{nl}$ , leads to:

$$\partial \boldsymbol{\Psi} = \int_{V_0} (\partial \mathbf{B}_l + \partial \mathbf{B}_{nl}) \cdot \mathbf{S} dV_0 + \int_{V_0} (\mathbf{B}_l + \mathbf{B}_{nl}) \cdot \partial \mathbf{S} dV_0 \quad (19)$$

Assuming stresses and strains related by the constitutive relation:

$$\partial \mathbf{S} = \mathbf{C}_T : \partial \boldsymbol{\epsilon}; \quad \partial \boldsymbol{\epsilon} = (\mathbf{B}_l + \mathbf{B}_{nl}) \partial \mathbf{D} \quad (20)$$

It turns out that if the increment in Eq. (19) is written as  $\partial\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{K}_T \partial\mathbf{D}^N$ , then:

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{K}_\sigma + \mathbf{K}_l + \mathbf{K}_{nl} \quad (21)$$

being the initial stress matrix given by:

$$\mathbf{K}_\sigma = \int_{V_0} \partial\mathbf{B}_{nl} \cdot \mathbf{S} dV_0 \quad (22)$$

and the normal linear stiffness matrix by:

$$\mathbf{K}_l = \int_{V_0} \mathbf{B}_l \cdot \mathbf{C}_t \mathbf{B}_l dV_0 \quad (23)$$

Finally, the non-linear, or large displacement stiffness matrix will be:

$$\mathbf{K}_{nl} = \int_{V_0} \mathbf{B}_l \cdot \mathbf{C}_t \mathbf{B}_{nl} dV_0 + \int_{V_0} \mathbf{B}_{nl} \cdot \mathbf{C}_t \mathbf{B}_l dV_0 + \int_{V_0} \mathbf{B}_{nl} \cdot \mathbf{C}_t \mathbf{B}_{nl} dV_0 \quad (24)$$

These results may be mapped back to the present configuration.

Equilibrium, Eq. (18), may be attained using Newton-Raphson procedure [8]. In that, at some iteration point,  $\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{D}_i) \neq \mathbf{0}$ , making  $\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{D}_i) + \partial\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{0}$ , where  $\partial\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{K}_T \partial\mathbf{D}$ , results in:

$$\partial\mathbf{D} = -\mathbf{K}_T^{-1} \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{D}_i) \quad (25)$$

Stress field obtained in this analysis, is relative to a static, or pseudo static loading. Resulting equations for the discretized geometry are solved with the processor of program Abaqus<sup>TM</sup> [9].

#### IV. RESULTS

The basic chassis for a short/medium/large version has channel profile of height H, width B and thickness T with values <250, 80, 7> mm, and sectional modulus  $W = 1.48e-4 \text{ m}^3$  for lengths ranging from 7 up to 9 m [4]. The transversal tubular elements have circular section of diameter  $D_t = 0.20 \text{ m}$  with thickness of 5 mm. These elements are disposed at regular distance from each other. The width of chassis is in the  $0.90 < W < 1.00 \text{ m}$  range.

In the extended hyperstatic model, values of bending moment show that the critical value occurs at the rear shaft with value  $M_c = -41.773e + 3 \text{ N m}$ . Supposing the material used in the construction of the chassis has the properties presented in Table 1, with yield resistance  $S_y = 345 \text{ MPa}$ , shows that the flexural stresses are  $\sigma_{rc} = M_c / W = 281.6 \text{ MPa}$ , giving a safety factor, for nominal load, equal to 1.22.

TABLE 1  
MATERIAL PROPERTIES

Mechanical Properties	Value
Elastic Modulus E GPa	307
Poisson's ratio $\nu$	0.33
Mass density $\rho$ kgm	7.87e+0
Yield Strength $S_{yt}$ MPa	345
Ultimate Strength $S_{ut}$ MPa	460

### A. Uniformly distributed load (UDL)

In order to obtain the response of the chassis frame to loading, a finite element model using shell elements is constructed. The model consists of a pair of longitudinal channel beams of length  $l = 12$  m, with front overhang  $f = 1.5$  m, inter-wheel distance  $c = a + b = 8$  m and rear overhang  $r = 2.5$  m, connected by a set of eleven tubulars of length  $w = 1$  m each, enclosed by front and rear channels. Total load in this configuration is  $W = 27$  tonf. Figure 2 shows the discretized model of the chassis under uniform load distribution, in static condition, being supported in front, middle and rear.

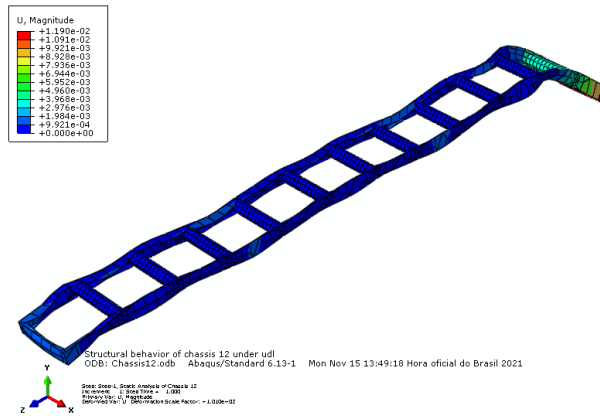


Fig. 2. Finite element model of chassis.

The chassis has in the front part a pair of parabolic springs, 1 m a part, placed symmetrically around the front wheels. In the middle and rear, a pair of elliptic springs under same distance, symmetrically disposed, around middle and rear shafts is used. Under the action of the uniformly distributed loading, inelastic phenomenae do not take place in the chassis, as Figure 3 shows for Mises stresses. Torsion in the frame is quite small for this loading.

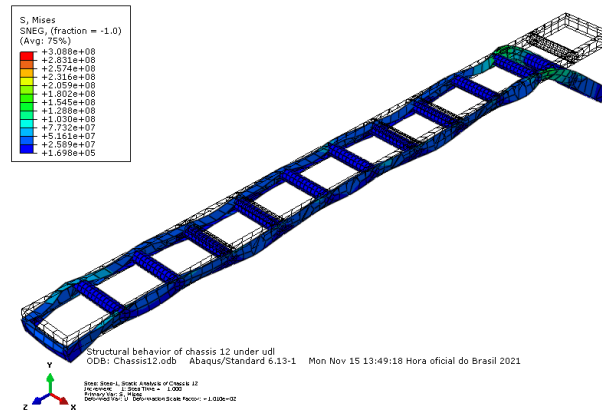


Fig. 3. Mises stress contour for hyperstatic chassis.

### B. Applied wheel displacement

While loaded in transport situations, uneven pavement conditions are frequently encountered. In Fig. 4 this case is considered with application of an applied displacement to the suspension system at the front left wheel corresponding to 2.5 tonf. This condition entails appearance of torsional effects. Even though the design scenario did not contemplate these conditions, maximum stresses occurring in the chassis did not show much higher values. Equivalent elastic stresses were less than the yield resistance of the material,  $\sigma' < S_{yt}$  all over. However, inelastic instability appeared in the webs of some channel sections. In order to mitigate these effect vertical struts, have to be installed in the space between webs to divide the free span and make this occurrence less possible – detailing process. Initial instability analysis, buckling, is a perturbation method applied around the initial unloaded configuration. Instability may be verified considering the increment vector  $d\Psi$  referred to a stable initial linear condition  $K_{nl} = 0$ , so that  $\partial\Psi = 0$ . Increasing the loads by a factor  $\lambda$ , we look for a value of this parameter such that

$$\partial\Psi = (K_I + \lambda K_\sigma)\partial D = 0 \quad (26)$$

This requires the determinant of the stiffness matrix be null  $\det[K_I + \lambda K_\sigma] = 0$ . Obtained values of  $\lambda$  are the eigenloads that cause instability. Buckling load multipliers for original chassis are shown in Table 2. In general buckling takes place around the rear axle. Each mode has a particular geometry indicating different forms of buckling according to the order of appearance of them. Local and global forms occur in the sequence.

TABLE 2. INSTABILITY LOADS OF CHASSIS.

Buckling Mode	Eigenvalue
1	3.2981
2	3.3379
3	-3.5911
4	3.5920
5	3.6208

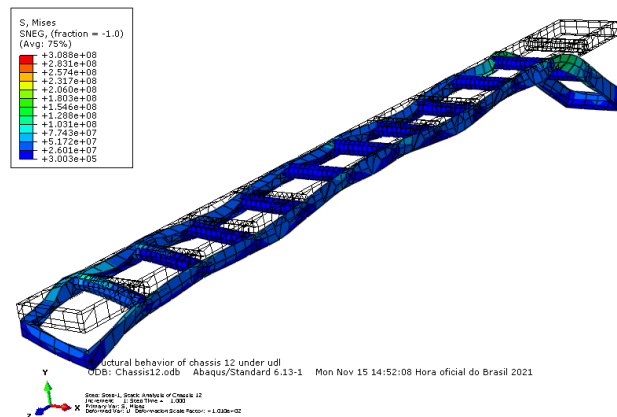


Fig. 4. Mises stress field for a front wheel vertical displacement.



### C. Axial inertial force

Presence of motion, with traction loading appearing in the wheels, brings inertial loads in the axial direction of the chassis. For one g acceleration, the obtained reactions are shown in Fig. 5, with a multiplier of 10. Induced normal efforts will bring an additional degree of hyperstaticity to the problem.

Another factor of concern is the association between working frequency range of the engine installed in the truck and the natural frequency of the chassis. In general, trucks have engines of large power, capable of large tractions; working at low velocities, say in the 1000-2000 rot/min, or 16.5 – 33.3 rot/sec [10]. These excitations should be well off the range of the natural frequencies of the chassis in order to avoid resonance. Determination of the natural frequencies and associated mode shapes of the chassis comes from the solution of the problem:

$$(K_i - \omega_i^2 M) D_i = 0 \quad (27)$$

For the set of frequencies  $\omega_i$  and associated modes  $D_i$  that make Eq. (27) null, when neither the first term, in brackets, nor the second, are null. In this case, first five frequencies were requested, with values well off the working frequency range of the normal engines.

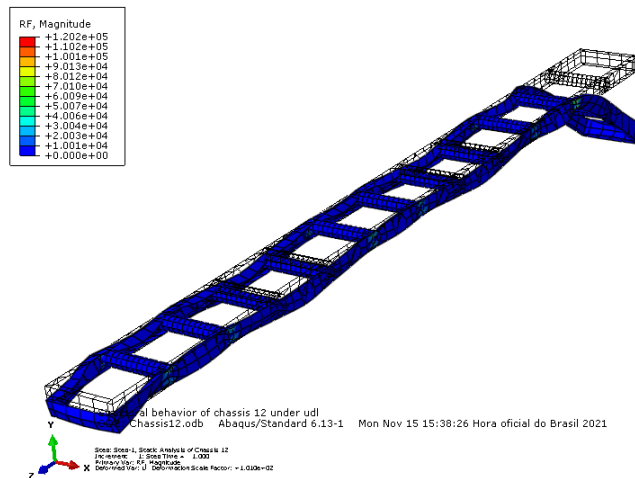


Fig. 5. Reaction efforts when inertial forces are present.

## V. CONCLUSIONS

Results show that modifications in chassis configurations can attend the requisites initially proposed. The initial design was conceived to guarantee certain flexibility for increments in load and size at the expense of weight. Also the design method for hyperstatic cases shows good agreements when UDL conditions are used in finite element analysis. Instability analysis, on the other hand, showed that buckling would occur if preventive measures, like installation of vertical struts in the middle of the span of sequential tubulars weren't taken. Critical section is usually at the rear shaft, where reinforcements should be provided after second order local analysis. The larger deflections in the UDL condition occurred in the end of the rear overhang under the acceptable range.

## REFERENCES

- [1] A. S. Patel, J. Chotransh, "Design and analysis of TATA 2518TC truck chassis frame with various cross sections using CAE tolls," *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, vol. 5, issue 9, pp. 692-714, 2016.
- [2] M. S. Agrawal, "Design and Analysis of Truck Chassis Frame," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pp. 76-85, 2018.
- [3] C. Ramesh, A. Kulshreshtha, "Chassis Stress Analysis and Optimization by using ANSYS," *IJSRD International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 3, issue 8, pp. 8-13, 2015.
- [4] J. B. De Aguiar, J.M. De Aguiar., "Static Design and Analysis of a Truck Chassis," *XX Congreso Nacional de Ingenieria Eletromecânica y de Sistemas*, CNIES 2021, México, Nov. 2021.
- [5] M. S. Agrawal, Md. Razik, "A Review on Study of Analysis of Chassis," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 3, issue 2, pp. 1135-1138, 2013.
- [6] V. K. Mulakalapalli, I. R. K. Raju, "Strength Evaluation of Tipper Chassis under Static and Dynamic Load Conditions," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, issue 11, pp. 1716-1728, 2018.
- [7] O. C. Zienckiewicz, R. L. Taylor, J.Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Buthworth-Heinemann, 7th ed., 2013.
- [8] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall, 2nd ed., 2006.
- [9] Abaqus Simulia 6-13-1, Abaqus Inc., Dassault Systèmes, 2013.
- [10] R.G. Budynas, J.K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, 10th ed., 2015.

## Revisión y análisis del estado de arte de los mecanismos flexibles: métodos de diseño y sus aplicaciones

State of the art review and analysis for compliant mechanisms: design methods and applications

Elvis **Coutiño-Moreno**<sup>1</sup>, Tomas **De la Mora-Ramírez**<sup>2</sup>  
Daniel **Maldonado-Onofre**<sup>3</sup>, Luis Antonio **Mier-Quiroga**<sup>4</sup>

Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-2455-2574> | [elvis.coutino@tesjo.edu.mx](mailto:elvis.coutino@tesjo.edu.mx)

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-6594-2777> | [tomas.delamora@tesjo.edu.mx](mailto:tomas.delamora@tesjo.edu.mx)

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-6078-2206> | [daniel.maldonado@tesjo.edu.mx](mailto:daniel.maldonado@tesjo.edu.mx)

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-8290-4115> | [luis.mier@tesjo.edu.mx](mailto:luis.mier@tesjo.edu.mx)

Recibido 08-10-2021, aceptado 17-12-2021

### Resumen

En los sistemas mecánicos se debe observar la importancia de la correcta aplicación de los criterios de diseño para evitar fallas relacionadas con la fatiga, deformaciones no deseadas y desgaste que afectan en la precisión de sus desplazamientos. Por esta razón, hoy en día el desarrollo de dispositivos mecánicos basados en mecanismos flexibles está teniendo un área de oportunidad. En el presente trabajo hace referencia a los diferentes métodos y técnicas (principalmente los basados en la optimización topológica) para abordar la complejidad inherente al desarrollo de mecanismos flexibles, por lo que se presenta una revisión y análisis del estado de arte de los diferentes métodos que existen en el diseño de los mecanismos flexibles, que permita identificar sus limitantes para el diseño en alguna aplicación de la ingeniería.

**Palabras clave:** mecanismos flexibles, optimización topológica, elementos finitos, SIMP, BESO.

### Abstract

In mechanical systems, the importance of the correct application of design criteria must be observed in order to avoid failures related to fatigue, undesired deformations and wear that affect the precision of their displacements. For this reason, nowadays the development of mechanical devices based on compliant mechanisms is having an area of opportunity. This paper refers to the different methods and techniques (mainly those based on topological optimization) to address the inherent complexity of the development of compliant mechanisms, so it presents a review and analysis of the state of the art of the different methods that exist in the design of compliant mechanisms, to identify their limitations for the design in any engineering application.

**Index terms:** compliant mechanisms, topological optimization, finite elements, SIMP, BESO.

## I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas mecánicos están conformados por mecanismos que son elementos móviles que interactúan entre sí para crear un movimiento específico, capaces de transmitir movimiento y fuerza. Los mecanismos “clásicos” o también denominados rígidos, al estar compuestos por elementos que se consideran infinitamente rígidos y juntas que interactúan entre sí, requieren de un constante mantenimiento y lubricación en los puntos de contacto entre los elementos que lo conforman, con el fin de reducir el desgaste, ruido, incremento de temperatura, disipación no deseada de energía, entre otros fenómenos relacionados con la fricción, sin olvidar los problemas de contaminación y suciedad que conlleva el uso de lubricantes.

El constante desarrollo de nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas da apertura a la mejora y optimización de sistemas mecánicos. Una solución prometedora para el reemplazo de los mecanismos rígidos, en sistemas donde se requiere una reducción del mantenimiento, limpieza, y disminución del número de componentes que lo conforman, son los denominados mecanismos flexibles.

Un mecanismo flexible son estructuras elásticas de una sola pieza que entrega un movimiento deseado cuando es sometido a una deformación elástica a diferencia de sus contrapartes rígidas. Tradicionalmente, los ingenieros han diseñado artefactos para que sean fuertes y rígidos, mientras que los diseños en la naturaleza son fuertes, pero no necesariamente rígidos. Al diseñar un mecanismo flexible el ingeniero busca aprovechar la elasticidad para proporcionar la función deseada eligiendo cuidadosamente la forma y el material [1].

Los mecanismos flexibles ofrecen características convincentes que los hacen valiosos para su aplicación en el diseño de productos y sistemas. El incremento de características como la alta precisión, bajo peso, compactación, baja fricción (o nula), reducción en los costos de ensamblaje, posibilidad de fabricación en masa y la capacidad de miniaturización representan algunas de sus ventajas [2].

Debido a las ventajas que estos mecanismos ofrecen, trabajos como el de Sigmund [3] han desarrollado métodos que permitan optimizar el diseño de micromecanismos, el método se basa en técnicas de optimización topológica de un dominio continuo y este encuentra la topología óptima del mecanismo dentro de dicho dominio de diseño, con base en una posición y dirección dadas de las fuerzas de entrada y salida.

La miniaturización de estos mecanismos es una de las características que se ha buscado aprovechar en el diseño de MEMS (MicroElectroMechanical Systems); Ramírez [4], en su tesis, presenta el diseño de un MEMS aplicando mecanismos flexibles y métodos computacionales como el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de Optimización Topológica (MOT) obteniendo diseños en 3D de estos microsistemas.

En el área de la biomecatrónica, Lan y Wang [5] diseñaron unas pinzas, aplicando una estructura flexible, que permite ajustar la fuerza de sujeción de estas y mantenerla constante, esto para manipulación de tejidos en cirugías mínimamente invasivas (MIS).

Varios autores, [6], [7], [8] han estudiado la viabilidad del uso de estos sistemas en diferentes áreas de la ingeniería y propuestos métodos para su diseño, los cuales presentan un gran reto para los ingenieros e investigadores debido a la complejidad del tema y de la solución de las ecuaciones que los rigen.

Sin embargo, en las últimas décadas nuestros conocimientos han avanzado. Hemos desarrollado nuevos materiales, aumentado nuestra capacidad de cálculo para diseñar dispositivos más sofisticados. Al mismo tiempo, la sociedad ha desarrollado nuevas necesidades que no pueden satisfacerse fácilmente con los mecanismos tradicionales. Esto significa que existe una mayor capacidad para crear mecanismos flexibles y una mayor motivación para hacerlo [2]. A continuación, se presenta una revisión y análisis del estado de arte de los diferentes métodos que existen para el diseño de mecanismos flexibles e identifican sus principales limitantes para el desarrollo de aplicaciones en la ingeniería.

## II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación y con el objetivo de identificar los métodos de diseño de mecanismos flexibles más utilizados en su desarrollo se implementó la siguiente metodología:

1. Identificación las ventajas y desventajas que estos presentan.
2. Consideraciones para el diseño de mecanismos flexibles.

3. Métodos de diseño, clasificación y subclasificaciones.
4. Métodos de optimización topológica (MOT).
5. Aplicaciones.
6. Se dan conclusiones.

### III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica y análisis del estado de arte.

#### A. Ventajas y desventajas

Los mecanismos flexibles son dispositivos mecánicos que logran su movimiento a través de la deformación, donde la fuente de su movimiento puede ser diversa. De hecho, la fuente puede ser mecánica (cargas de fuerza), eléctrica (voltajes o corrientes), térmica (cambios en la temperatura), entre otras [9]. Un ejemplo de mecanismos flexibles se presenta en la Fig. 1.

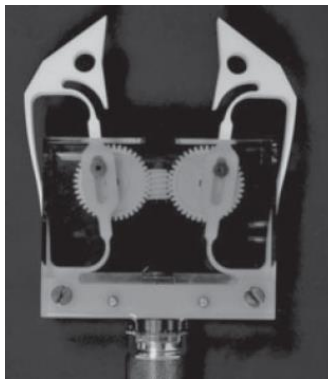


Fig. 1. Mecanismo flexible de gripper en posición abierta [2].

Debido a su composición monolítica una de las principales ventajas que resalta en este tipo de mecanismos es la integración de funciones en un número mínimo de partes y a diferencia de sus contrapartes rígidas (mecanismos rígidos) unos de las principales limitantes es la aplicación de fuerzas pequeñas (véase Tabla 1).

TABLA 1  
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MECANISMOS FLEXIBLES [9]

Ventajas	Desventajas
Fabricación simplificada (en serie).	Desplazamientos y fuerzas pequeñas.
Estructuras leves.	Limitaciones de fatiga y fluencia.
No necesitan montaje, ni lubricación.	Comportamiento complejo que dificulta su diseño.
Mecanismos compactos.	
Precio.	
Portabilidad (ligeros).	
Habilidad para trabajar a microescala (MEMS).	
Alta precisión y confiabilidad (sin holguras).	

Como podemos observar estas estructuras presentan cualidades que los mecanismos rígidos no, como la posibilidad de fabricación en serie que permitiría una reducción de costos a altos volúmenes de producción (véase Fig. 2).



Fig. 2. Producción en masa de un mecanismo flexible [10].

### *B. Consideraciones para el diseño de mecanismos flexibles*

En el apartado anterior se presentaron un gran número de ventajas que los mecanismos flexibles poseen sobre sus contrapartes rígidas. Howell [2] recomienda tener una cuidadosa consideración al momento de diseñar un mecanismo flexible en tres importantes áreas: el fallo a la fatiga, alcanzar grandes deformaciones y mantener la rigidez fuera del eje. A continuación, se describen cada una de las tres áreas.

#### *1) El fallo a la fatiga*

Una de las principales preocupaciones al momento de diseñar un mecanismo flexible es el fallo a la fatiga, en este tipo de estructuras se pueden producir fallos por cargas a tensión, compresión, torsión o flexión, pero la flexión, y a veces la torsión, llegan a ser las cargas dominantes en el sistema. En la flexión, la vida a la fatiga estará estrechamente correlacionada con el esfuerzo máximo que es una función de la deflexión y del momento de inercia de la viga. Dado que la flexión es lo que el diseñador trata de conseguir, el medio para reducir la tensión y aumentar la vida a la fatiga es reducir el momento de inercia adecuado. Esto se hace generalmente haciendo la viga "más delgada" [2].

#### *2) Alcanzar grandes deformaciones*

Para los nuevos diseñadores de mecanismos flexibles les es difícil visualizar que los dispositivos sean capaces de lograr grandes deformaciones en sus elementos sin fallar. Sin embargo, muchos dispositivos cotidianos (tapa del shampoo o de la pasta dental) logran grandes deformaciones sin fallar. Para un nuevo diseñador es útil pensar en tres formas básicas de lograr grandes deflexiones en configuraciones comunes de mecanismo flexibles [2]:

- Reducir el momento de inercia de un elemento en flexión (o el momento polar de inercia para torsión).
- Aumentar la longitud del elemento en flexión o torsión para incrementar proporcionalmente su deformación.
- Si los elementos individuales no pueden alcanzar en la práctica las deflexiones deseadas, el diseñador puede optar por disponer los elementos deflectores en serie, requiriendo así menos deflexión de un miembro individual.

#### *3) Mantener la rigidez fuera del eje*

Para los mecanismos flexibles el movimiento no ocurre en las articulaciones, que son los puntos de unión de los elementos rígidos en los mecanismos rígidos, este se produce porque se permite que los elementos del sistema se

desvíen por efecto de la aplicación de una carga y así puedan lograr el comportamiento deseado. Howell [2] recomienda cuidar la relación de rigidez entre un eje no deseado (posición incorrecta) y el eje deseado (posición correcta), si se logra una relación alta se asegurará la posición deseada en el mecanismo y por lo contrario si esta es baja el elemento será más propenso a desviar su dirección a posiciones no deseadas.

### C. Métodos para diseñar mecanismos flexibles

Para los diseñadores o investigadores que tienen poca experiencia en el campo de los mecanismos flexibles, encontrar un punto de partida desde el cual guiarse para el análisis, diseño y optimización de estos sistemas mecánicos ha sido uno de los principales problemas. Gallego [11], a partir de su investigación, clasifica los métodos de diseño de mecanismos flexibles en tres grandes enfoques; los basados en la cinemática (kinematic approach), los basados en bloques de construcción (building blocks approach) y el enfoque basado en la optimización estructural (structural optimization), véase Fig. 3. Debido a la complejidad que representa el diseño de mecanismos flexibles, es necesario del uso de técnicas avanzadas de optimización o diseño automático como lo es el MOT. Existen dos grandes abordajes para el MOT en el diseño de mecanismos flexibles, el primero se conoce como optimización discreta (ground structures) y el segundo se conoce como optimización continua. En el primer abordaje se utilizan elementos estructurales tipo viga, armadura o barra, donde se establece *a priori* una conectividad, mientras que la optimización determina que barras permanecen y cuáles no. En el abordaje continuo se tiene una distribución continua de material, que luego es dividida usando una discretización por elementos finitos; mientras tanto, la optimización topológica determina cuáles elementos permanecen en la topología óptima y cuáles no. Este segundo abordaje es el más comúnmente utilizado en la literatura y por ello se han desarrollado varias estrategias [9]. Thomas [12] describe cinco métodos para el desarrollo de los mecanismos flexibles resaltando sus aplicaciones y limitaciones (véase Tabla 2).

TABLA 2  
DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO PARA MECANISMOS FLEXIBLES, INDICANDO SUS APLICACIONES Y LIMITACIONES [12]

Método	Descripción	Aplicaciones y limitaciones
Método de libertad y restricción (FACT por sus siglas en ingles)	Proporciona una solución topológica para el espacio de libertad conocido y el espacio de restricción basado en la teoría de los tornillos, en la que se utilizan giros y llaves para representar las restricciones y grados de libertad de los elementos conformes.	* Sintetizado de mecanismos flexibles con deflexiones pequeñas e intermedias. * La investigación sobre el análisis de grandes deformaciones, la representación de la mecánica elástica, las características dinámicas y los errores parásitos, es limitado.
Bloques de construcción	Dos métodos principales basados en: a) centros instantáneos, y b) bloques flexibles de construcción y optimización.	* Sintetizado de mecanismos flexibles con deflexiones intermedias y grandes. * Puede resultar una geometría inviable en función del bloque básico de construcción elegido.
Optimización topológica	Utiliza algoritmos de optimización para buscar la mejor topología del mecanismo flexible para realizar el objetivo de diseño, sujeto a los requisitos y restricciones deseados, generalmente a través de métodos de elementos finitos.	* Es el método de síntesis más utilizado para el desarrollo de estos dispositivos por su capacidad de generar soluciones a partir de un amplio espacio de diseño. Dificultad para tener en cuenta las tensiones localizadas y el pandeo. Las topologías resultantes son a veces difíciles de fabricar, lo que justifica la impresión en 3D o el posprocesamiento para fabricación.
Sustitución de cuerpos rígidos	Utiliza el modelo de cuerpo pseudorrígido para reemplazar los miembros y juntas con enlaces rígidos equivalentes y juntas móviles, con resortes para capturar la energía de la deformación elástica.	* Método de orden reducido que se basa en métodos de cinemática de cuerpo rígido, proporcionando un análisis más intuitivo. * La precisión del análisis se resiente con el aumento de la complejidad del mecanismo.
Mapas de selección	Utiliza un catálogo de mecanismos flexibles cuyas características de rigidez e inercia inherentes se capturan en modelos de resorte-masa-palanca que se adapten a las especificaciones del usuario para los propósitos de la selección	* Puede incorporar consideraciones prácticas de selección de materiales, la posibilidad de fabricación, la resistencia y el escalado. * Actualmente se limitan a las CM de una sola entrada y salida.



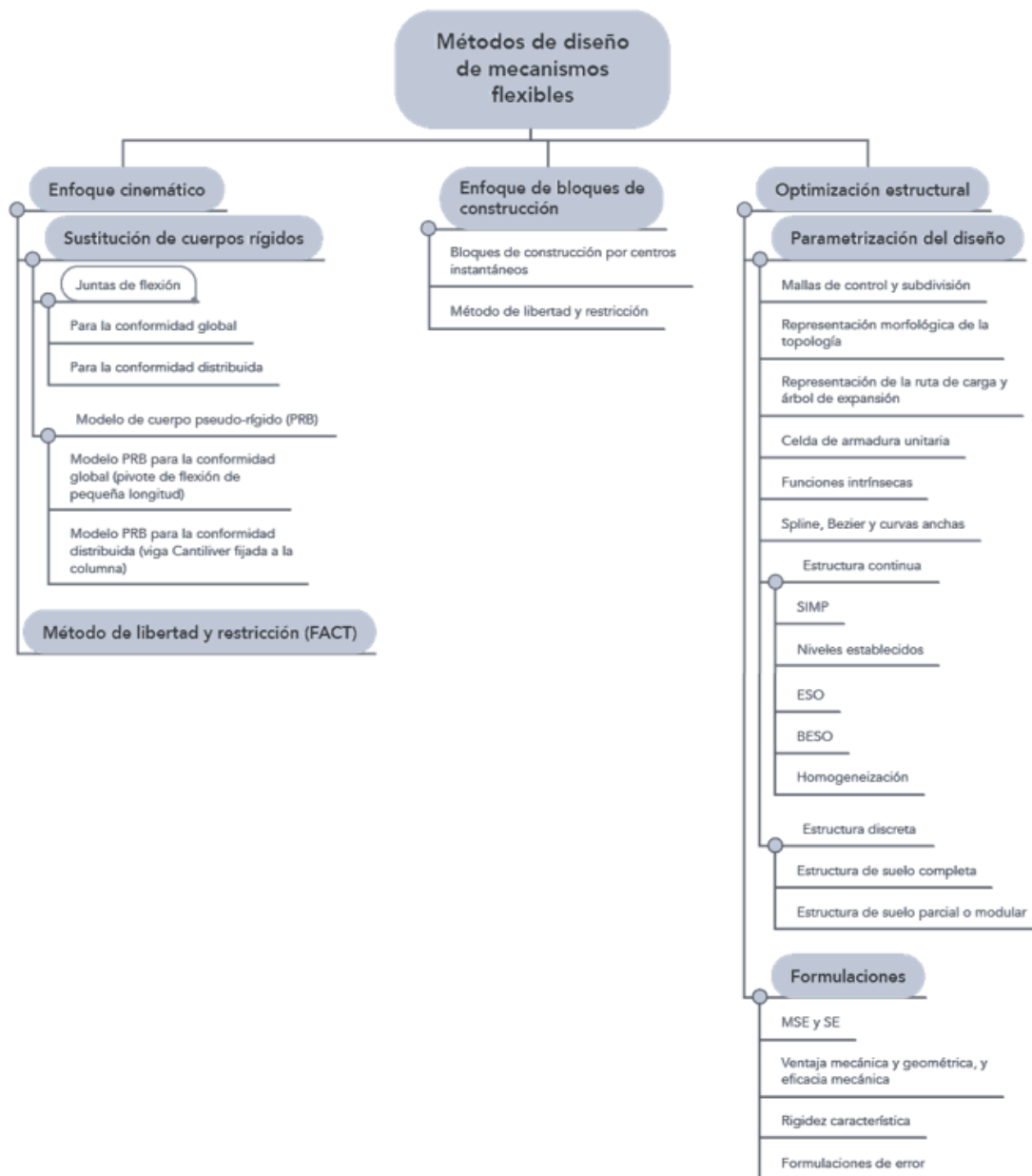


Fig. 3. Clasificación de los métodos de diseño de mecanismos flexibles [11].

#### D. Métodos de optimización topológica

A continuación, se presentan dos de los métodos más utilizados en el diseño de los mecanismos flexibles dentro del enfoque de optimización continua o también conocido como estructura continua (continuum structure).

##### 1) Estructura continua

Este método parte de un dominio inicial el cual es discretizado en subdominios, aplicando el MEF, donde cada subdominio es una representación matemática de las micro o macroestructuras que componen el total del

dominio. La idea básica detrás del uso de estructuras continuas es comenzar con un dominio de diseño que está lleno de elementos mientras que gradualmente, durante la optimización, se eliminan aquellos elementos que no se utilizan efectivamente, de modo que al final, sólo quedan los elementos esenciales para lograr los requisitos de diseño, véase Fig. 4, el método ESO (Evolution Structural Optimization) es representativo de este enfoque [11], [13].

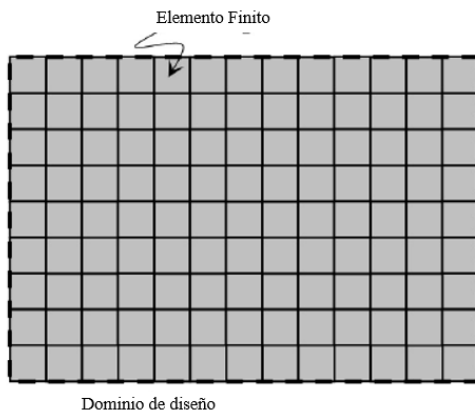


Fig. 4. Continuum structure [11].

#### a) Método SIMP

Normalmente, cuando se realiza una optimización de la topología, se desea que las variables de diseño expresen la existencia o inexistencia de un elemento en el dominio de diseño. Esto se hace asumiendo un valor de 1, el elemento existe, o 0, el elemento se elimina del dominio. Cuando el algoritmo de optimización se basa en gradientes cuyas variables pueden oscilar en el intervalo  $[0, 1]$ , surge un problema, el algoritmo no puede tratar con variables booleanas. El método SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization Method) ayuda a superar este problema penalizando las variables de diseño, por lo que los valores intermedios pueden ser asumidos como 0 o 1 [11].

Inicialmente el método SIMP fue propuesto por Bendsoe [14] y Rozvany [15], el método SIMP predice una distribución óptima del material dentro de un espacio de diseño determinado, para casos de carga determinados, condiciones de contorno, restricciones de fabricación y requisitos de rendimiento [16].

Según Bendsoe [17]: "la optimización de la forma en su configuración más general debe consistir en una determinación para cada punto del espacio, independientemente de que haya material en ese punto o no". El enfoque tradicional para la optimización de topología es la individualización de un dominio en una rejilla de elementos finitos denominados microestructuras sólidas isotrópicas. Cada elemento se rellena con material para regiones que requieren material, o se vacía de material para regiones donde se puede eliminar material (que representa vacíos) [16]. La distribución de densidad del material dentro de un dominio de diseño,  $\rho$ , es discreta y a cada elemento se le asigna un valor binario:

- $\rho_e = 1$  donde se requiere material (negro).
- $\rho_e = 0$  donde se elimina material (blanco).

La introducción de una función de distribución de densidad relativa continua evita la naturaleza binaria, on-off del problema. Para cada elemento, la densidad relativa asignada puede variar entre un valor mínimo  $\rho_{min}$  y 1, lo que permite la asignación de densidades intermedias para elementos (caracterizados como elementos

porosos):  $\rho_{min}$  es el valor de densidad relativa mínimo permitido para elementos vacíos que son mayores que cero. Este valor de densidad asegura la estabilidad numérica del análisis de elementos finitos, véase Fig. 5 [16]. Dado que la densidad relativa del material puede variar continuamente, el módulo de Young del material en cada elemento también puede variar continuamente. Para cada elemento  $e$ , la relación entre el factor de densidad relativa del material  $\rho_e$  y el módulo de elasticidad de Young del modelo de material isotrópico asignado  $E_0$  se calcula mediante la ley de potencia:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (1)$$

8

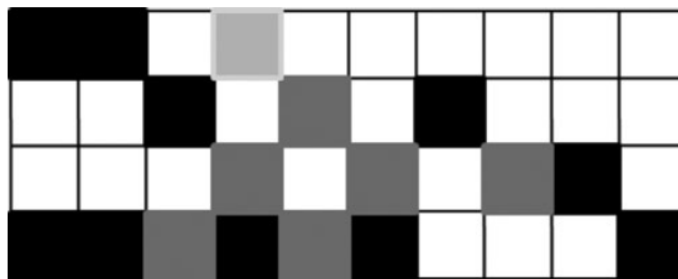


Fig. 5. Optimización con método SIMP, elementos sólidos (negros), elementos vacíos (blancos) y elementos intermedios (gris) [2].

El factor de penalización  $p$  disminuye la contribución de elementos con densidades intermedias (elementos grises) a la rigidez total. Los experimentos numéricos indican que es adecuado un valor de factor de penalización de  $p = 3$  (véase Fig. 6) [16].

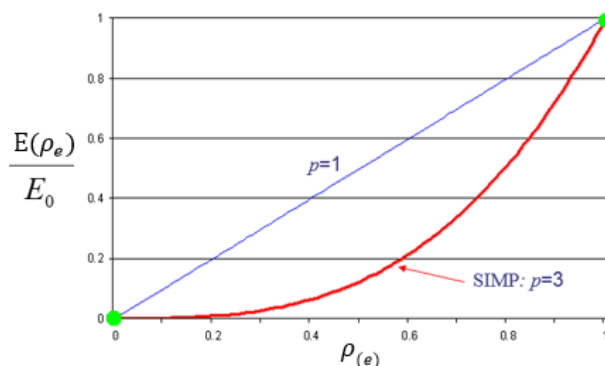


Fig. 6. Efecto del factor de penalización  $p$  en el proceso de solución de optimización de elementos sólidos a vacíos [16].

Debido al proceso de reducción de la densidad de los elementos dentro del dominio del diseño el módulo de Young de cada elemento es afectado, este proceso influye directamente en la rigidez de cada elemento del dominio y en la matriz de rigidez global del dominio de diseño. El método SIMP modula la rigidez global del dominio con la ecuación (2) [16]:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (2)$$

Donde  $K_e$  es la matriz de rigidez del elemento,  $\rho_{min}$  es la densidad relativa mínima,  $\rho_e$  es la densidad relativa del elemento,  $p$  es el factor de penalización y  $N$  es el número de elementos que conforman el dominio de diseño.

Para lograr definir el término del proceso de optimización es necesario una función objetivo, dicha función permitirá al método determinar el momento en el que ha cumplido con la tarea. Una de las funciones más utilizadas es la de maximizar la rigidez general del dominio o minimizar su cumplimiento bajo una determinada cantidad de eliminación de masa sobre el dominio.

El algoritmo de optimización, ecuación (3), mediante un proceso iterativo, busca resolver las densidades de los elementos (que son las variables de diseño de optimización) que minimizan el cumplimiento global de la estructura [16].

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e^p) [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (3)$$

Donde  $u_e$  es el vector de desplazamiento nodal del elemento,  $K_e$  es la rigidez del elemento  $e$ , y el vector  $\{\rho\}$  contiene las densidades relativas de los elementos  $\rho_e$ .

Las ecuaciones (4), (5) y (6) permiten al proceso satisfacer las restricciones de masa, equilibrio global y restricción funcionales requeridas [16]:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{objetivo} \quad (4)$$

Donde  $v_e$  es el volumen del elemento y  $M_{objetivo}$  es la masa objetivo en la optimización.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\} \quad (5)$$

Donde  $K\{\rho\}$  es la matriz de rigidez global en función del vector densidades relativas,  $\{u\}$  es el vector de desplazamiento y  $\{F\}$  es el vector de fuerzas externas.

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots \quad (6)$$

La fórmula anterior contiene restricciones de respuesta de diseño, como límites de tensiones, desplazamientos, frecuencias propias, etc.

Durante cada iteración, el algoritmo de optimización realiza un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto que tiene la variación de las densidades del material en la función objetivo para maximizar la rigidez, ecuación (7).

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (7)$$

Durante un análisis de sensibilidad, los elementos ponderados con factores de baja densidad de material eventualmente pierden su importancia estructural y se eliminan durante las iteraciones posteriores. Si calcula la sensibilidad para cada elemento de forma independiente y no considera la conectividad entre los elementos, esto puede llevar a la discontinuidad del material y a que los volúmenes se desconecten de la geometría principal. Esto se conoce como efecto de tablero de ajedrez [16].

### b) Método BESO

La optimización estructural evolutiva (ESO) y su versión posterior ESO bidireccional (BESO) se han aplicado con éxito a problemas de distribución de materiales óptimos para estructuras continuas. Sin embargo, los métodos ESO / BESO existentes se limitan a la optimización de la topología de una función objetivo, como el cumplimiento medio de una única restricción, por ejemplo, el volumen estructural. El método funciona como se ilustra en la Fig. 7 [9].

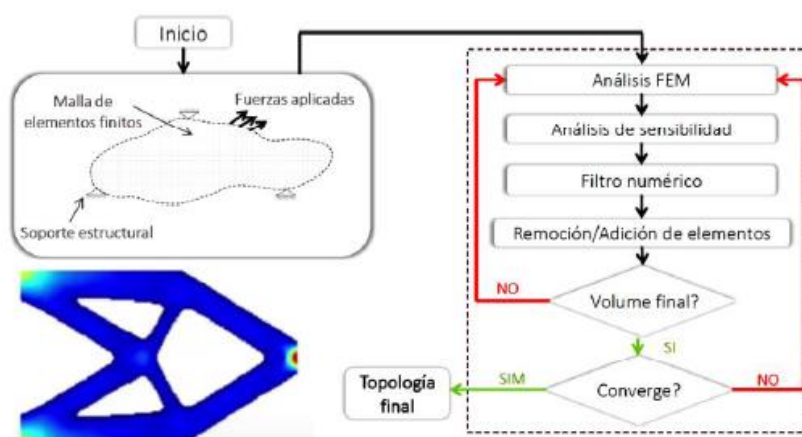


Fig. 7. Flujograma del método de optimización topológica basada en BESO [9].

El método BESO puede ser resumido como sigue [9]:

- Paso 1. El dominio diseño se discretiza utilizando el MEF y se definen condiciones de frontera y carga.
- Paso 2. Se definen los objetivos a cumplir.
- Paso 3. Se procede al análisis y solución de los elementos finitos.
- Paso 4. Se realiza el análisis de sensibilidad (derivadas de la función objetivo y de restricciones).
- Paso 5. Se utiliza un filtro para prevenir algunas inestabilidades numéricas, como conexión de elementos en un solo nodo.
- Paso 6. Se verifican dos criterios de convergencia (volumen deseado, no hay cambios significativos en el diseño).

El objetivo en el diseño de los mecanismos flexibles mediante el método de la optimización topológica es maximizar un desplazamiento de salida bajo unas condiciones de carga de entrada. Lo anterior se puede lograr mediante una función de ventaja geométrica, ecuación (9), definida como la relación entre el desplazamiento de salida y de entrada. Adicionalmente también se podría considerar una función que tome en cuenta la rigidez (compliance) de la estructura con el fin de obtener geometrías que no sean muy débiles. Para considerar estos dos objetivos en una sola función se considera la ecuación (8) [9], [19].

$$\text{Maximize: } h(x_e) = \frac{GA}{SE}, \quad \text{Sujeto a: } V^* - \sum_{e=1}^N V_e x_e = 0, x_e = x_{min} \text{ o } 1 \quad (8)$$

$$GA = \frac{u_{out}}{u_{in}}, SE = \frac{1}{2} U_2^T K U_2 \quad (9)$$

Donde  $x_e$  la variable de diseño definida para cada elemento finito, que puede tomar valores  $x_e = 1$  de (sólido) y  $x_e = 0$  (vacío). El número total de elementos en la malla es  $N$ ;  $V^*$  es una fracción del volumen total del dominio de diseño original;  $V_e$  es el volumen del elemento  $e$ ;  $u_{out}$  es el desplazamiento para maximizar de un grado de libertad (GDL) en un punto de la estructura; mientras que  $u_{in}$  es el desplazamiento causado por la fuerza externamente aplicada  $F_{in}$  en la estructura, véase Fig. 8 [9], [19].

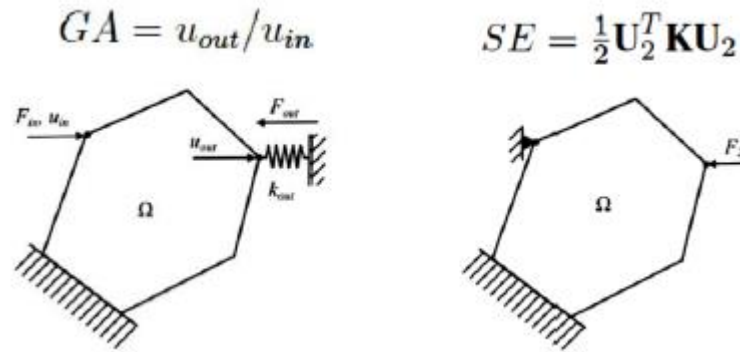


Fig. 8. Dominio de diseño genérico y condiciones de frontera para mecanismos flexibles. Izquierda: Ganancia geométrica. Derecha: rigidez estructural [9], [19].

Por último,  $K$  y  $U$  son la matriz de rigidez y el vector de desplazamientos nodales obtenidos al resolver el sistema lineal de ecuaciones que surge del análisis de elemento finito [9], [19].

$$KU = F \quad (10)$$

Como se indicó anteriormente, el análisis de sensibilidad es equivalente a encontrar las derivadas de la función objetivo y las restricciones respecto a las variables de diseño, lo cual es necesario para el optimizador actualizar el valor de las variables de diseño a cada iteración [9].

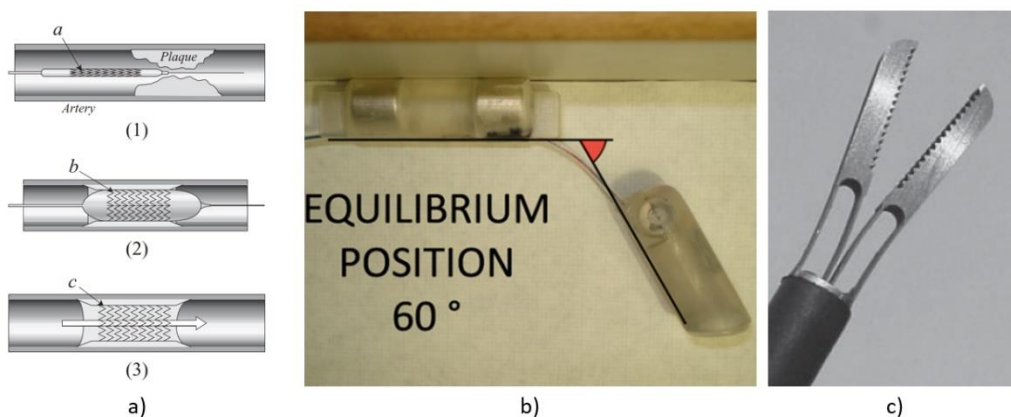
### E. Aplicaciones

El Grupo de Investigación de Mecanismos Flexibles de BYU (CMR) conformado por estudiantes y profesores comparten, a través su página web, los resultados de sus investigaciones en el tema de mecanismos flexibles. Sus diseños han impactado en áreas como la Biomecánica, Robótica, Aeroespacial, como se muestra en la Fig. 9 [20].



**Fig. 9.** Sistema de posicionamiento de propulsor, diseño realizado para la NASA [20].

En la Fig. 10 se observa una serie de mecanismo flexibles con aplicaciones en el área de la medicina [2].



**Fig. 10.** Aplicaciones de los mecanismos flexibles en la medicina, a) Angioplastia, b) Endoscopia [21], c) Laparoscopia [2].

Dichos sistemas representan una amplia variedad de oportunidades para el desarrollo de nuevas aplicaciones en áreas de la ingeniería tales como la biomecánica, un ejemplo de ello es el trabajo realizado por Peter [22], en el cual presenta el diseño de una prótesis de dedo a partir de una estructura monolítica, aplicando el método de cuerpo pseudo-rígido, este sistema permite grandes deformaciones y la sujeción de objetos ligeros (véase Fig. 11).

Los mecanismos flexibles son sistemas que se están aplicando en muchas áreas de la ingeniería y que al momento se siguen buscando nuevas áreas de oportunidad para su aplicación, especialmente en sistemas donde se busca la eliminación de las desventajas que sus contrapartes rígidas tienen.



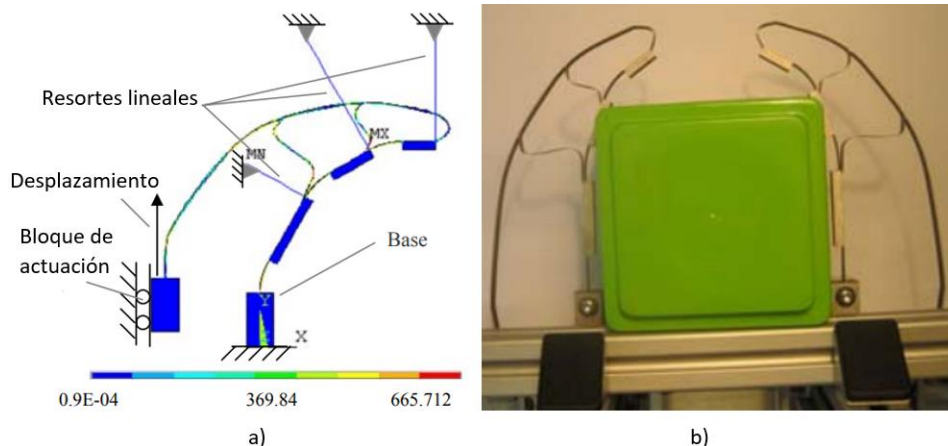


Fig. 11. Prototipo de una prótesis de dedo fabricado con Titanio, a) Esfuerzos de Von Mises, b) Pruebas de funcionamiento [22].

#### IV. CONCLUSIONES

Los mecanismos flexibles son dispositivos mecánicos que, gracias a los avances en el desarrollo de nuevos materiales, sus ventajas y características morfológicas, representan una gran oportunidad en la optimización de sistemas mecánicos ya existentes, por tal motivo se realizó la presente investigación y de la cual se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las ventajas mecánicas que presentan estos dispositivos, como la eliminación de la lubricación, miniaturización, exactitud, entre otras, han permitido su aplicación en áreas de la medicina.
- La selección del método de diseño a implementar depende principalmente de los niveles de deflexión y la complejidad del mecanismo requerido.
- Dentro de los métodos de diseños que existen, el MOT presenta ventajas frente a los otros métodos mencionados en el presente trabajo gracias a que dicho método hace uso de los elementos finitos.
- Para la aplicación de los métodos SIMP y BESO, es de gran importancia la correcta definición y aplicación de las funciones objetivo y las ecuaciones de sensibilidad, esto para evitar desconexiones de los elementos en el dominio de diseño “efecto de tablero de ajedrez”.
- La correcta aplicación de los criterios de diseño recomendados por Howell [2] evitarán una falla prematura en el mecanismo por fatiga y obtener las deformaciones deseadas en el sistema.
- El estudio de los mecanismos flexibles sigue siendo una gran área de oportunidad dentro de la ingeniería e investigación. El constante desarrollo de los equipos de cómputo representa una gran ventaja para el uso de modelos y técnicas computacionales tales como el MOT y el MEF en el diseño de estos dispositivos.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Kota, “Compliant systems using monolithic mechanisms,” *Smart Materials Bulletin*, vol. 3, pp. 7-10, Mar. 2001.
- [2] L. L. Howell, S.P. Magleby, B. M. Olsen, *Handbook of Compliant Mechanism*, 1ª ed, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] O. Sigmund, “On the design of compliant mechanisms using topology optimization,” *Mechanics of Structures and Machines*, vol. 25, no. 4, pp. 493-524, 1997.
- [4] F. J. Ramírez-Gil, “Diseño óptimo de micromecanismos tridimensionales con actuación electrotérmica utilizando optimización topológica y unidades de procesamiento gráfico (GPU),” Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.

- [5] C. C. Lan, J. Y. Wang, "Design of Adjustable Constant-Force Forceps for Robot-Assisted Surgical Manipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2012, pp. 386-391.
- [6] C. A. Narváez, D. A. Garzón-Alvarado, "Síntesis topológica de mecanismos flexibles para aplicaciones biomédicas," *Rev. Cubana de investigaciones Biomédicas*, vol. 29, no. 1, pp. 1-16, ene. 2010.
- [7] M. Ling, J. Cao, L.L. Howell, M. Zeng, "Kinetostatic modeling of complex compliant mechanisms with serial-parallel substructures: A semi-analytical matrix displacement method," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 125, pp. 169–184, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.03.014>
- [8] S. Noveanu, N. Lobontiu, J. Lazaro, D. Mandru, "Substructure compliance matrix model of planar branched flexure-hinge mechanisms: Design, testing and characterization of a gripper," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 91, pp. 1-20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.04.001>
- [9] C. M. Pérez-Madrid, "Optimización topológica de mecanismos flexibles," in *La Ingeniería y sus Aplicaciones: Una Perspectiva desde la Industria, la Investigación y la Educación*, 1ª ed, Medellín, Colombia: Serie de libros de ingeniería, 2020, pp. 153-161, available: <https://sites.google.com/view/siia-2020/libro>
- [10] "Por qué las Máquinas Flexibles son Mejores," *Veritasium en español*, 2019 [video en línea], available: <https://www.youtube.com/watch?v=zloPStY2mbl&t=208s>
- [11] J. A. Gallego, J. Herder, "Synthesis methods in compliant mechanisms: an overview," *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, California, USA, August-September 2009, pp. 1-22.
- [12] T. L. Thomas, V. K. Venkiteswaren, G. K. Ananthasuresh, S. Misra, "Surgical applications of compliant mechanisms: a review," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 13, enero 2021, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4049491>
- [13] G. I. N. Rozvany, "A critical review of established methods os structural topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 37, no. 3, pp. 217-237, doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0217-0>
- [14] M. P. Bendsoe, N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 197-224, 1988.
- [15] G. I. N. Rozvany, M. Zhou, and T. Birker, "Generalized shape optimization without homogenization", *Structural optimization*, vol. 4, no. 3-4, pp. 250-252, 1992.
- [16] Dassault Systemes, "Método SIMP para optimización de topología." Ayuda en línea de SolidWorks. [http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm#vdl1527111485501](http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm#vdl1527111485501) (accesed Sep. 27, 2021).
- [17] M. P. Bendsoe, "Optimal shape design as a material distribution problema", *Structural Optimization*, vol. 1, pp. 193-202, 1989.
- [18] X. Huang, Y.M. Xie, "Evolutionary topology optimization of continuum structures with an additional displacement constraint," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 40, no. (1-6), pp. 409-416, doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0382-4>
- [19] Y. Li, X. Huang, Y.M. Xie, S.W. Zhou, "Evolutionary topology optimization of hinge-free compliant mechanisms," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 86, pp. 69–75, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.01>
- [20] BYU CMR, "research-areas-and-applications." Compliant Mechanism Research. <https://www.compliantmechanisms.byu.edu/> (accesed Sep. 27, 2021).
- [21] M. Simi, N. Tolou, P. Valdastrì, J. L. Herder, A. Menciasì, P. Dario, "Modeling of a compliant joint in a magnetic levitation system for an endoscopic camera," *Mechanical Sciences*, vol. 3, pp. 5-14, 2012, doi: <https://doi.org/10.5194/ms-3-5-2012>
- [22] S. Peter, G. A. Kragten, J. L. Herder, "Desing o fan underactuated finger with a monolithic structure and largely distributed compliance," *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Quebec, Canada, agosto 2010, vol. 2, pp. 355-363, doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2010-28127>

## Investigación científica sobre tecnologías empleadas en quemadores de biomasa tipo pellets a pequeña escala, como potencial energético alternativo: una revisión bibliométrica

Scientific research on technologies used in small-scale pellet-type biomass burners as alternative energy potential: a literature review

Arly Darío **Rincón-Quintero**<sup>1</sup>, Luis Alfonso **Del Portillo-Valdés**<sup>2</sup>, Omar **Lengerke-Perez**<sup>3</sup>  
Wilmar Leonardo **Rondón-Romero**<sup>4</sup>, Camilo Leonardo **Sandoval-Rodríguez**<sup>5</sup>  
Brayan Eduardo **Tarazona-Romero**<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA | Universidad del País Vasco, ESPAÑA  
<https://orcid.org/0000-0002-4479-5613> | [arincon@correo.uts.edu.co](mailto:arincon@correo.uts.edu.co)

<sup>2</sup>Universidad del País Vasco, ESPAÑA  
<https://orcid.org/0000-0001-9064-005X>

<sup>3</sup>Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA  
<https://orcid.org/0000-0001-9360-7319>

<sup>4</sup>Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA  
<https://orcid.org/0000-0001-9500-9531>

<sup>5</sup>Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA | Universidad del País Vasco, ESPAÑA  
<https://orcid.org/0000-0001-8584-0137>

<sup>6</sup>Unidades Tecnológicas de Santander, COLOMBIA | Universidad del País Vasco, ESPAÑA  
<https://orcid.org/0000-0001-6099-0921>

Recibido 08-11-2021, aceptado 13-01-2022

### Resumen

La investigación se centra en la implementación de un software de visualización de redes bibliométrica denominada VOSviewer, donde se procesan los registros obtenidos en la literatura científica, identificando los recientes avances en calderas de biomasa (caso de estudio: pellets) a pequeña escala, aplicando una metodología en análisis de redes y vigilancia de bases de datos, desarrollando redes con palabras clave, coautoría y acoplamiento bibliográfico, graficas que permiten visualizar las tendencias y resaltan el comportamiento de la comunidad académica sobre una determinada temática.

Los autores con mayor relevancia, recomiendan la adición de caolín en biomásas, pudiéndose disminuir las emisiones contaminantes. También, destacan la implementación de tecnologías que controlen el flujo de aire primario y secundario en la combustión, repercutiendo en una mejora en la eficiencia, todo esto, con la extracción continua de cenizas sin tener que detener o afectar el proceso de combustión y el uso de filtros para material particulado.

**Palabras clave:** VOSviewer, calderas de pellets, revisión bibliográfica.

### Abstract

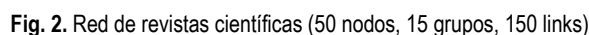
The research focuses on the implementation of a bibliometric network visualization software called VOSviewer, where the records obtained in the scientific literature are processed, identifying the recent advances in small-scale biomass boilers (case study: pellets), applying a methodology in network analysis and monitoring of databases, developing networks with keywords, co-authorship and bibliographic coupling, graphs that allow trends to be visualized and highlight the behavior of the academic community on a given topic.

The most relevant authors recommend the addition of kaolin in biomass, being able to reduce polluting emissions. Also, they highlight the implementation of technologies that control the flow of primary and secondary air in combustion, resulting in an improvement in efficiency, all this, with the continuous extraction of ashes without having to stop or affect the combustion process and the use filters for particulate matter.

**Index terms:** VOSviewer, pellet boilers, literature review.



3



En esta red, es posible señalar la fortaleza que tienen autores como Jorma Jokiniemi con 11 publicaciones, siendo referente en la investigación de calderas de pellets a pequeña escala, al igual que Claudia Schön y Hans Hartmann.

En el trabajo de [2], se exponen las dificultades que tiene la astilla de madera para ser implementada en calderas para calefacción de hogares, debido a los niveles de emisiones de monóxido de carbono y las partículas emitidas. Sin embargo, En [4], se desarrollan pruebas con astillas de madera variando la calidad del secado y del cribado, con el propósito de cumplir los requerimientos de la norma ISO 17225-4, en la misma línea, en [5], se



analiza de forma detallada los procesos de secado y tamizado que afectan la combustión en una caldera automática a pequeña escala. Los autores coinciden en señalar que la reducción de humedad reduce las emisiones de CO y el tamizado, reduce la emisión de NO<sub>x</sub> en al menos un 28%.

El trabajo en [6], demuestra que la adición de caolín a la biomasa, logra disminuir las emisiones de CO hasta un 77%, adicionalmente, en [7] se recomienda una proporción de caolín del 0.5% en peso, para una disminución de las emisiones en un 46%; siendo corroborado en el estudio de [8], donde se analizan diferentes aditivos, entre los cuales está la caolinita. La ceniza es otro factor importante en los quemadores de biomasa; en [9] se estudia este residuo basándose en el control de la temperatura y correlaciones empíricas, usando hasta 9 equipos diferentes a pequeña escala, mostrando que la composición química del combustible o la biomasa, repercute en la cantidad generada, debiéndose eliminar de manera continua, es decir, a una velocidad proporcional con la alimentación del combustible.

El acoplamiento bibliográfico, es otra aplicación del software, con esto, es posible observar los documentos, su relevancia obtenida por el número de citas que ha recibido y su fortaleza en vínculos debido a las referencias usadas.

TABLA 1  
LISTA DE DOCUMENTOS ORDENADOS POR FUERZA DE ENLACE.

Autor	Citaciones	Fuerza de enlace	Documentos
Ozgen (2021)	9	529	[10]
Fournel (2015b)	73	516	[11]
Vicente (2020)	4	445	[12]
Zeng (2016)	54	393	[13]
Lim (2015)	26	347	[14]
Moran (2015)	14	335	[15]
Lamberg (2013)	56	324	[16]
Regueiro (2019)	4	322	[17]
Zeng (2019)	6	321	[5]
Lamberg (2017)	8	281	[18]

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al momento de analizar los documentos progresivamente se evidencia que las investigaciones realizadas sobre los quemadores de pellets, biomasa, astillas de madera, etcétera, se han enfocado principalmente en el análisis de las emisiones de gases contaminantes, lo que se convierte en un tema de gran relevancia debido al objetivo de reemplazar los combustibles actuales de la industria, como el carbón y derivados del petróleo. Con los ojos puestos en este objetivo, es indispensable que los nuevos biocombustibles no generen mayor daño que los combustibles convencionales actuales. Por ello, los investigadores analizan diferentes aspectos de los quemadores de biomasa, como la cámara de combustión, el control del flujo de aire, las combinaciones o los aditivos para la biomasa, los intercambiadores de calor a la salida de los gases de la combustión, entre otros temas relacionados, que se irán abordando a lo largo de esta sección.

#### A. Combustibles

Cuando se trata sobre los combustibles, se abordan los estudios que analizan la composición de la biomasa, al agregar diferentes tipos de material vegetal, aditivos químicos que favorezcan la combustión o estabilidad de la misma y en general estudios que tengan un enfoque en la combustión presente en las calderas o estufas a pequeña escala para aplicaciones rurales [15] [17] [19] [20] [21] [22].

### B. Emisiones

Las emisiones generadas por las calderas y estufas en zonas residenciales se han convertido en la principal preocupación de los investigadores junto con las cenizas que dificultan la operación de los mismos, en esta sección se agrupan los estudios cuyo objetivo es analizar emisiones generadas [16] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29].

### C. Diseño y eficiencias

En lo que a investigaciones sobre calderas y estufas de pellets a pequeña escala se refiere, las investigaciones se han centrado principalmente en el control de las emisiones como se ha establecido anteriormente, pero esto no deja exenta a la comunidad académica de generar diseño o propuestas que permitan aprovechar de forma eficiente el poder calorífico de la biomasa, por ello en esta sección se aborda el tema de la eficiencia y de los diseños que se encuentran en estudio para el mejoramiento continuo de estos equipos [30] [31] [32].

## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación del software de visualización de redes VOSviewer permitió exponer de forma clara y precisa las tendencias en investigación sobre las calderas de pellets a pequeña escala, brindando información gráfica de fácil interpretación. Entre estas, se destaca una investigación centralizada en la disminución de emisiones contaminantes, desde diferentes perspectivas, como la incorporación de aditivos en los combustibles, mezclas de diferentes biomasa mejoramientos en la eficiencia de las calderas y regulaciones con base en el flujo de aire.

Teniendo en cuenta que el diseño de la caldera, el tipo de biomasa y las condiciones de la combustión afectan directamente a la generación de material particulado, es indispensable tener en cuenta para futuros diseños un mecanismo que permita extraer simultáneamente las cenizas sin detener el proceso de combustión.

Para la combustión es normal transformar la biomasa de tres formas: pajas, astillas y pellet. Siendo este último el más recomendado por los investigadores por permitir una combustión más eficiente y con menor cantidad de emisiones contaminantes. También se debe aplicar un debido tratamiento de secado, porque los niveles altos de humedad en el combustible generan mayores niveles de emisiones. El caolín representa una de las mayores oportunidades como aditivo para disminuir emisiones, tema que se observa de manera recurrente para aplicaciones en calderas de pequeña escala.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS).

### REFERENCIAS

- [1] Z. S. Vásquez *et al.*, "Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review," *Waste Manag.*, vol. 90, pp. 72-83, 2019.
- [2] C. Schön, D. Kuptz, R. Mack, V. Zelinski, A. Loewen, H. Hartmann, "Influence of wood chip quality on emission behaviour in small-scale wood chip boilers," pp. 71-82, 2019.
- [3] E. D. Vicente *et al.*, "Emissions from residential pellet combustion of an invasive acacia species," *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 319-329, 2019.
- [4] D. Kuptz *et al.*, "Evaluation of combined screening and drying steps for the improvement of the fuel quality of forest residue wood chips—results from six case studies," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 9, no. 1, pp. 83-98, 2019.
- [5] T. Zeng *et al.*, "Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 9, no. 1, pp. 99-116, 2019.
- [6] R. Mack, D. Kuptz, C. Schön, H. Hartmann, "Biomass and Bioenergy Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler," *Biomass and Bioenergy*, vol. 125, no. April, pp. 50-62, 2019.
- [7] T. Huelsmann, R. Mack, M. Kaltschmitt, H. Hartmann, "Influence of kaolinite on the PM emissions from small-scale combustion," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 9, no. 1, pp. 55-70, 2019.
- [8] N. Dragutinovic, B. Nakomcic-Smaragdakis, S. Djuric, D. Djordjic, "Investigation of additives in combustion of wheat straw pellets in a small scale boiler," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 4, p. 43101, Jul. 2019.
- [9] S. Feldmeier, E. Wopienka, M. Schwarz, C. Schön, C. Pfeifer, "Applicability of Fuel Indexes for Small-Scale Biomass



- Combustion Technologies, Part 1: Slag Formation,” *Energy & Fuels*, vol. 33, no. 11, pp. 10969–10977, Nov. 2019.
- [10] S. Ozgen, S. Cernuschi, S. Caserini, “An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110113, 2021.
- [11] S. Fournel *et al.*, “Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops,” *Appl. Energy*, vol. 141, pp. 247–259, 2015.
- [12] E. D. Vicente, A. M. Vicente, M. Evtyugina, L. A. C. Tarelho, S. M. Almeida, C. Alves, “Emissions from residential combustion of certified and uncertified pellets,” *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 1059–1071, 2020.
- [13] T. Zeng, N. Weller, A. Pollex, V. Lenz, “Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices,” *Fuel*, vol. 184, pp. 689–700, 2016.
- [14] M. T. Lim, A. Phan, D. Roddy, A. Harvey, “Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 574–584, 2015.
- [15] J. C. Morán, J. L. Míguez, J. Porteiro, D. Patiño, E. Granada, “Low-Quality Fuels for Small-Scale Combustion Boilers: An Experimental Study,” *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 5, pp. 3064–3081, May 2015.
- [16] H. Lamberg, J. Tissari, J. Jokiniemi, O. Sippula, “Fine Particle and Gaseous Emissions from a Small-Scale Boiler Fueled by Pellets of Various Raw Materials,” *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 11, pp. 7044–7053, Nov. 2013.
- [17] A. Regueiro, L. Jezerská, R. Pérez-Orozco, D. Patiño, J. Zegzulka, J. Nečas, “Viability evaluation of three grass biofuels: Experimental study in a small-scale combustor,” *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [18] H. Lamberg *et al.*, “Operation and Emissions of a Hybrid Stove Fueled by Pellets and Log Wood,” *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 2, pp. 1961–1968, Feb. 2017.
- [19] A. Rincón-Quintero, L. Portillo-Valdés, A. Meneses-Jácome, J. Ascanio Villabona, B. Tarazona Romero, M. Durán-Sarmiento, “Performance Evaluation and Effectiveness of a Solar-Biomass Hybrid Dryer for Drying Homogeneous of Cocoa Beans Using LabView Software and Arduino Hardware,” *Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, oct. 2020, pp. 238–252.
- [20] A. Regueiro, L. Jezerská, D. Patiño, R. Pérez-Orozco, J. Nečas, M. Židek, “Experimental study of the viability of low-grade biofuels in small-scale appliances,” *Sustain.*, vol. 9, no. 10, 2017.
- [21] S. Fournel, J. Palacios, S. Godbout, M. Heitz, “Effect of Additives and Fuel Blending on Emissions and Ash-Related Problems from Small-Scale Combustion of Reed Canary Grass,” *Agriculture*, vol. 5, no. 3, pp. 561–576, 2015.
- [22] G. Garrido-Silva, J. Maradey Lazaro, A. Rincón-Quintero, O. Lengerke Perez, C. Sandoval Rodriguez, C. Cardenas-Arias, “Estimation of the Energy Consumption of an Electric Utility Vehicle: A Case Study,” 2021, pp. 257–272.
- [23] J. Hrdlička, P. Skopec, T. Dlouhý, F. Hrdlička, “Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels,” *Fuel*, vol. 165, pp. 68–74, 2016.
- [24] A. D. Rincón-Quintero *et al.*, “Manufacture of hybrid pieces using recycled R-PET, polypropylene PP and cocoa pod husks ash CPHA, by pneumatic injection controlled with LabVIEW Software and Arduino Hardware,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 844, no. 1, 2020.
- [25] M. Gehrig, D. Jaeger, S. K. Pelz, R. Kirchhof, H. Thorwarth, W. Haslinger, “Influence of a Direct Firebed Cooling in a Residential Wood Pellet Boiler with an Ash-Rich Fuel on the Combustion Process and Emissions,” *Energy & Fuels*, vol. 30, no. 11, pp. 9900–9907, Nov. 2016.
- [26] S. Kasurinen *et al.*, “Toxicological characterization of particulate emissions from straw, Miscanthus, and poplar pellet combustion in residential boilers,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 41–51, 2016.
- [27] A. T. Zosima, L. A. V Tsakanika, M. T. Ochsenkühn-Petropoulou, “Particulate matter emissions, and metals and toxic elements in airborne particulates emitted from biomass combustion: The importance of biomass type and combustion conditions,” *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 52, no. 6, pp. 497–506, May 2017.
- [28] A. Rincón-Quintero, L. Portillo-Valdés, A. Meneses-Jácome, C. Sandoval Rodriguez, W. Rondón-Romero, J. Ascanio Villabona, “Trends in Technological Advances in Food Dehydration, Identifying the Potential Extrapolated to Cocoa Drying: A Bibliometric Study,” *Recent Advances in Electrical Eng., Electronics and Energy*, 2021, pp. 167–180.
- [29] G. Reichert *et al.*, “Impact of oxidizing honeycomb catalysts integrated in firewood stoves on emissions under real-life operating conditions,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 177, no. Feb. 2018, pp. 109–118, 2018.
- [30] J. G. M. Lázaro, A. D. Rincón-Quintero, C. L. Sandoval-Rodríguez *et al.*, “Design and set up of a pulverized panela machine,” *Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, no. 4, pp. 812–828, 2021.
- [31] D. Petrocelli, A. M. Lezzi, “Modeling operation mode of pellet boilers for residential heating,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 547, no. 1, 2014.
- [32] E. A. C. Quintana, B. E. Tarazona, “Characterization of mechanical vibrations in a metal structure using the transform Cepstrum,” *Engineering and Natural Sciences*, vol. 9, no. 4, pp. 767–777, 2021.

## Flujos óptimos de potencia con restricciones de estabilidad ante pequeños disturbios

Optimal power flow with small signal stability constraints

José Antonio Gándara-Capistrán<sup>1</sup>, Daniel Olguín-Salinas<sup>2</sup>

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-9296-8913> | [jgandarac1900@alumno.ipn.mx](mailto:jgandarac1900@alumno.ipn.mx)

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7721-4347> | [dolguin@ipn.mx](mailto:dolguin@ipn.mx)

Recibido 08-10-2021, aceptado 13-01-2022

### Resumen

En grandes sistemas de potencia interconectados el problema de estabilidad ante pequeños disturbios recibe atención debido a las oscilaciones ocasionales o a la variación en la demanda del mismo, para esto se incorpora al problema de optimización matemática de flujos óptimos de potencia una restricción de estabilidad ante pequeños disturbios, la cual se basa en el teorema de Lyapunov modelada como un problema de programación semidefinida, la cual dicta que su matriz  $P$  sea positiva definida y simétrica para garantizar la estabilidad del sistema, la solución se hace mediante el método de optimización matemática punto interior con ayuda del software AMPL, *A Modeling Language for Mathematical Programming*, donde se hará la simulación sobre el sistema de prueba del *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, *Western System Coordinating Council* o WSCC que consta de 9 nodos y 3 máquinas modificado para este propósito.

**Palabras clave:** flujos óptimos de potencia, estabilidad ante pequeños disturbios, programación semidefinida, Lyapunov.

### Abstract

A power system presents different stability problems, the small-signal stability problem receives attention to the occasional oscillations and the change in its demand, for this and the need to optimize resources a small-signal stability constraint is incorporated in the optimal power flow problem, this constrain is based on Lyapunov's theorem and is modeled as a semi-definite programming problem, where the matrix  $P$  must be positive definite and symmetric to guarantee the system stability. The problem is solved by the interior point method. The simulations have been conducted with AMPL in the WSCC 9-bus 3-machine system.

**Index terms:** optimal power flow, small signal stability, semi-definite programming, Lyapunov.

## I. INTRODUCCIÓN

En virtud de la necesidad de optimizar recursos en el sistema eléctrico de potencia, minimizar costos a través de un despacho económico óptimo se realiza con la implementación de flujos óptimos de potencia, donde sucede una modificación en la potencia suministrada por cada generador, de acuerdo con su costo de operación creando un nuevo punto de operación. Con estas implementaciones es inminente un cambio importante en los resultados obtenidos de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios [1].

En grandes sistemas de energía interconectados, el problema de estabilidad ante pequeños disturbios ha estado recibiendo atención debido a la oscilación ocasional. Los controladores de amortiguación se aplican a menudo para mejorar la estabilidad, entre las cuales el estabilizador del sistema de potencia (PSS) es el más rentable. Sin embargo, no pueden garantizar que no se produzcan oscilaciones. Los operadores independientes del sistema deben despachar la generación en función de los objetivos económicos mediante un flujo de potencia óptimo tradicional (FOP), mientras tanto, deben garantizar un margen de seguridad con respecto a la estabilidad de pequeños disturbios [2], [3].

Debido a esto, para probar una solución a los problemas de estabilidad ante pequeños disturbios en este artículo se agrega al modelo de FOP una restricción de estabilidad ante pequeños disturbios (FOP-REAPD), la cual está basada en el método directo de Lyapunov que garantiza la estabilidad del sistema y aumenta su confiabilidad, en la literatura se pueden encontrar diferentes restricciones incorporadas al problema de FOP, la restricción manejada en este trabajo está basada únicamente en la ecuación de Lyapunov sin considerar la denominada abscisa espectral [2] con un modelo de máquina de cuarto orden extraído del libro [4], al cual se le quitaron los controles para poder observar el comportamiento del sistema únicamente con nuestra restricción.

FOP-REAPD no sustituye a un PSS ni a ninguna otra acción de control existente, sino que proporciona medios adicionales para obtener el margen de estabilidad requerido. Es un desafío modelarlo ya que las restricciones de estabilidad ante pequeños disturbios no se pueden incorporar directamente en el modelo de FOP mediante restricciones lineales o no lineales [2].

El modelo FOP-REAPD se formula en términos de las sensibilidades de primer o segundo orden de los eigenvalores críticos con respecto a algunas variables. Por tanto, la principal ventaja de estos enfoques aproximados es hacer que las limitaciones de estabilidad ante pequeños disturbios sean fáciles de manejar. Sin embargo, es posible que los resultados sean más costosos económicamente para cumplir con estas restricciones de estabilidad [5].

En general, FOP-REAPD es un problema de optimización de eigenvalores el cual se resuelve por el método de punto interior con ayuda de la programación semidefinida (PSD), la cual se basa en la teoría de la década de 1980 donde Lewis y Overton construyeron el marco teórico de optimización de eigenvalores [6][7].

## II. METODOLOGÍA

### A. Flujos óptimos de potencia

El despacho económico (DE) es el cálculo que encuentra el despacho de generación de menor costo para un conjunto de generadores que está restringido dentro de los límites del generador individual y da como resultado una generación total que es igual a la carga total más las pérdidas. El cálculo del DE ignora los detalles específicos de la red a la que están conectados los generadores y agrupa todos los efectos de la red en las pérdidas y la demanda de carga total [8].

El FOP combina el cálculo del DE con un cálculo de flujo de potencia para que el DE y el flujo de potencia se resuelvan simultáneamente. Las pérdidas totales del sistema de energía son simplemente parte del cálculo del flujo de energía y se reflejan en la carga de la generación en el bus de referencia; por lo tanto, no hay necesidad de calcular específicamente las pérdidas, ya que son inherentemente parte del flujo de potencia [8].

En nuestro problema se debe considerar minimizar la siguiente función objetivo:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_{2i}P_{Gi}^2 + a_{1i}P_{Gi} + a_{0i}) \quad i \in S_G \quad (1)$$

Donde  $P_{Gi}$  es la salida de potencia del generador  $i$ ,  $a_{2i}$ ,  $a_{1i}$ ,  $a_{0i}$ , es la función de costos de cada generador,  $S_G$  es el conjunto de todos los generadores y  $N_G$  el número total de generadores. Además, se considera el siguiente conjunto de restricciones de igualdad y desigualdad [5]:

Restricciones de igualdad que representan el balance de potencia en cada bus  $i$  [2].

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in i} V_i Y_{ij} V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in i} V_i Y_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $P_{Di}$  y  $Q_{Di}$  representan la potencia activa y reactiva demandada en cada bus  $i$ , respectivamente,  $Y_{ij}$  son los elementos de la matriz de admitancias, así como  $\alpha_{ij}$  son los ángulos de los elementos de dicha matriz,  $P_{Gi}$  y  $Q_{Gi}$  son la salida activa y reactiva del generador  $i$  y por último  $V_i$  es el voltaje en cada bus  $i$  con su ángulo correspondiente  $\theta_i$  [2].

Restricciones de desigualdad que representan las limitaciones técnicas del sistema en generación de potencia activa y reactiva por cada generador  $i$  y el balance de voltaje nodal del sistema [2]:

$$\begin{aligned} V_{i_{min}} &\leq V_i \leq V_{i_{max}} \\ P_{Gi_{min}} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi_{max}} \\ Q_{Gi_{min}} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi_{max}} \end{aligned} \quad (3)$$

Un modelo FOP “estándar” se define básicamente como un problema de optimización con restricciones no lineales, que consta de una función objetivo (1), un conjunto de restricciones de igualdad (2) y desigualdad (3). Las restricciones de estabilidad ante pequeños disturbios se incorporan al modelo de FOP estándar, lo que genera el modelo con el cual se trabaja en este artículo [2], [9].

### B. El análisis de estabilidad ante pequeños disturbios y su modelo matemático

El estudio al problema de estabilidad ante pequeños disturbios surge debido al fenómeno del cambio en la demanda eléctrica y la generación de esta misma de acuerdo con el horario del día, estos estudios se realizan debido a que la demanda puede cambiar de una hora a otra, así que, es necesario analizar este comportamiento y comprobar si nuestro sistema es capaz de soportar estos pequeños cambios. Cuando un sistema de potencia se encuentra en condiciones normales de operación, puede ser sometido a dos tipos de pequeños disturbios [10], [11]:

- 1) Un disturbio de forma temporal y siendo un sistema estable se espera que el sistema regrese a sus condiciones normales.
- 2) Un disturbio de forma permanente y como consecuencia se espera que el sistema alcance un nuevo punto de operación.

Para analizar la estabilidad del sistema en estos estudios se realiza la linealización de las ecuaciones alrededor de un punto de operación, el principal interés está relacionado con el comportamiento del ángulo del rotor y los componentes de los generadores, que se interconectan a la red eléctrica. Ya sea en condiciones

normales o ante un pequeño disturbio, podemos darnos cuenta de que la respuesta del ángulo es de naturaleza oscilatoria, se dice que el sistema es estable, si cuenta con el amortiguamiento necesario para mantener las oscilaciones y continuar operando sin problemas, por otro lado, si las oscilaciones comienzan a crecer en amplitud, entonces se dice que el sistema es inestable [10], [11].

El comportamiento de los sistemas de potencia puede describirse mediante ecuaciones diferenciales y algebraicas, en este modelo se considera la ecuación de oscilación y las ecuaciones diferenciales  $E'_d$  y  $E'_q$  para de este modo expresar el modelo de la máquina de la siguiente manera [2]:

4

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i - \omega_s \\ \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i - \omega_s \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{T_{Mi}}{M_i} - \frac{[E'_{qi} - X'_{di}I_{di}]I_{qi}}{M_i} - \frac{[E'_{di} + X'_{qi}I_{qi}]I_{di}}{M_i} - \frac{D_i(\omega_i - \omega_s)}{M_i} \quad (5)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = -\frac{E'_{qi}}{T'_{doi}} - \frac{(X_{di} - X'_{di})I_{di}}{T'_{doi}} \quad (6)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = -\frac{E'_{di}}{T'_{qoi}} + \frac{I_{qi}}{T'_{qoi}}(X_{qi} - X'_{qi}) \quad (7)$$

Donde  $\delta_i$  representa el ángulo de carga de cada generador,  $\omega_i$  representa a la velocidad angular,  $E'_d$  y  $E'_q$  son los voltajes internos del generador en eje directo y eje cuadratura respectivamente,  $I_d$  y  $I_q$  son la inyección de corrientes del generador en eje directo y eje cuadratura,  $X'_d$  y  $X'_q$  son las reactancias transitorias del eje directo y cuadratura,  $T'_{do}$  y  $T'_{qo}$  son constantes de tiempo transitorias y  $M_i$  es una constante de inercia.

Al modelo de la máquina se le agregan las ecuaciones de condiciones iniciales (8) y las ecuaciones de la red del sistema (9) [2].

$$\begin{aligned} P_{Gi} - V_i I_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) - V_i I_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) &= 0 \\ Q_{Gi} - V_i I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) + V_i I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) &= 0 \\ E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_{si} I_{di} + X'_{qi} I_{qi} &= 0 \\ E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_{si} I_{qi} - X'_{di} I_{di} &= 0 \\ E'_{di} - (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_{di} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{qi} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + P_{Di}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \\ I_{di} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + Q_{Di}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \\ P_{Di}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \\ Q_{Di}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

En el conjunto de ecuaciones (8-9) se muestran variables especificadas con anterioridad a las cuales se le agrega una la cual es  $R_{si}$  que es la resistencia de armadura de cada generador.

Las ecuaciones (4-9) se linealizan por series de Taylor para formar nuestro modelo de estado como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \Delta x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y_a \\ \Delta y_b \end{bmatrix} + E[\Delta u] \\ \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \Delta x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y_a \\ \Delta y_b \end{bmatrix} + E[\Delta u] \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times 2m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{2m \times n}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{2m \times 2m}$ ,  $\Delta x \in \mathbb{R}^n$ ,  $\Delta y \in \mathbb{R}^{2m}$ ,  $m$  representa el número de buses mientras que  $n$  representa el número de variables de estado.

- $A$  es la matriz de los datos de la máquina.
- $B$  es la matriz que contiene los voltajes y corrientes de la máquina.
- $C$  es la matriz que contiene las ecuaciones algebraicas del estator.
- $D$  es la matriz de las ecuaciones de la red del sistema.
- $\Delta x$  es el vector de variables de estado.
- $\Delta y_a$  y  $\Delta y_b$  es el vector de salida del sistema.
- $\Delta u$  es el vector de entradas al sistema.

Eliminando  $\Delta y_a$  y  $\Delta y_b$  obtenemos que [2], [4]:

$$\Delta \dot{x} = A_{sis} \Delta x \quad (11)$$

donde

$$A_{sis} = (A - BD^{-1}C) \quad (12)$$

$A_{sis}$  será la ecuación característica del sistema la cual nos dará la información necesaria para el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios.

### C. Programación semidefinida

La PSD es programación lineal sobre el cono de matrices semidefinidas positivas. En la PSD lineal, se minimiza una función lineal sujeta a la restricción de una combinación afín de matrices simétricas la cual es semidefinida positiva. El PSD lineal, que puede verse como una generalización de la programación lineal, se ha utilizado ampliamente en la teoría de control, la teoría de sistemas, la optimización de eigenvalores y la optimización de combinaciones [12].

El problema de PSD lineal es el siguiente:

$$\begin{aligned} \min & c^T x \\ \text{s. t. } & F(x) \succ 0 \end{aligned} \quad (13)$$

donde

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^k x_i F_i \quad (14)$$

$x$ ,  $c$  y  $F$  son matrices simétricas. La notación  $>$  en 13 denota que  $F(x)$  es semidefinida positiva. La desigualdad en (13) es llamada desigualdad de matriz lineal [2].

Recordado teorema de estabilidad de Lyapunov, el diferencial 11 es estable si y solo si, existe una matriz real positiva simétrica  $P$  tal que:

$$-A_{sis}^T P - P A_{sis} > 0 \quad (15)$$

La matriz  $P$  integrada en la ecuación 15 como se dijo arriba debe ser una matriz real positiva simétrica y adicional a ello es necesario que sea una matriz definida positiva lo que implica que como dice la regla de Sylvester una condición necesaria y suficiente para que una matriz sea definida positiva es que el determinante de todas las submatrices superiores izquierdas de la matriz sean positivos. Por ejemplo, para una matriz  $P$  simétrica de  $3 \times 3$  como se muestra en la ecuación 16, se requiere que los determinantes del conjunto 17 sean positivos.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{31} \\ P_{21} & P_{22} & P_{32} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_{11} &> 0 \\ P_{11} * P_{22} - P_{21}^2 &> 0 \\ \det(P) &> 0 \end{aligned} \quad (17)$$

En la ecuación 15 todos los valores propios de  $A$  para el sistema estable tienen partes reales negativas como nos dice el teorema de estabilidad de Lyapunov [13].

La ecuación 15 será la utilizada como nuestra restricción de estabilidad ante pequeños disturbios que en conjunto con las ecuaciones de flujos óptimos de potencia. Las ecuaciones de condiciones iniciales del sistema 8 y las ecuaciones de la red mostradas en el conjunto 9 completan nuestro modelo matemático para resolver el problema FOP-REAPD [2], [14].

### III. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Para realizar la solución del problema FOP-REAPD se hizo la simulación en el software AMPL mediante el solver KNITRO basado en el método de punto interior el cual es utilizado para resolver problemas de PSD, el sistema de prueba que se utilizó fue el sistema de prueba de la IEEE conocido como WSCC de 9 nodos y 3 máquinas en los nodos 1, 2 y 3 respectivamente, así como 3 cargas en los nodos 5, 6 y 8 las cuales son mostradas en la Tabla 1 [9], [15].

En esta sección se encontrarán dos comparaciones diferentes siempre con el mismo sistema de prueba, la primera que está formada por la Fig. 2 y la Tabla 3 donde se compara los resultados obtenidos del modelo FOP, FOP-REAPD y los datos obtenidos de [4], y la segunda mostrada en las Figuras 3, 4 y 5 donde a nuestro modelo FOP-REAPD se le simula un pequeño disturbio y se muestran los resultados del redespacho obtenido.

Por último se muestra una comparativa en el costo operativo del sistema cuando se incluye nuestra restricción ante pequeños disturbios al problema de optimización matemática de FOP.



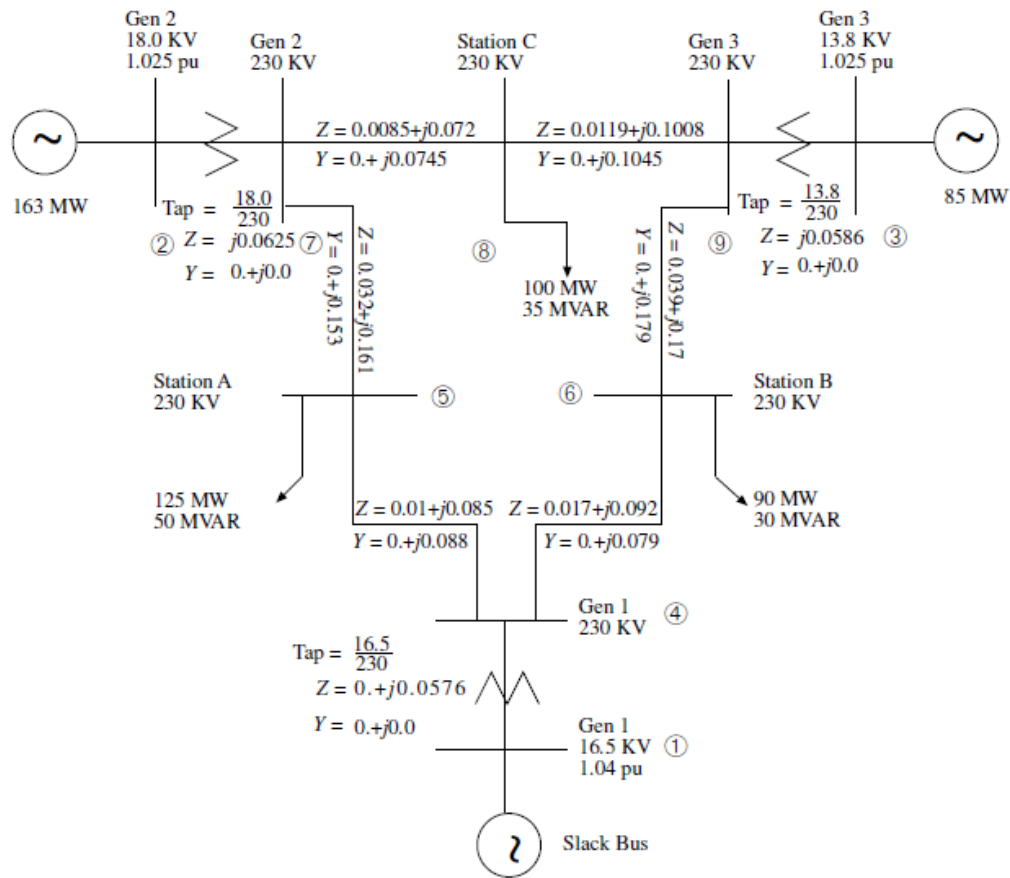


Fig. 1. Sistema WSCC 9 nodos y 3 máquinas [4].

En la Fig. 1 se muestran los datos necesarios para la simulación de nuestro problema, adicional a ello en la Tabla 2 se muestran los datos de cada una de las máquinas.

TABLA 1  
CARGAS CONECTADAS AL SISTEMA WSCC

Carga	P (MW)	Q (MVAR)
1	125	50
2	90	30
3	100	35

TABLA 2  
DATOS DE LOS GENERADORES [4]

Parámetros	Gen 1	Gen 2	Gen 3
$H$	23.64	6.4	3.01
$X_d$	0.146	0.8958	1.3125
$X'_d$	0.0608	0.1198	0.1813
$X_q$	0.0969	0.8645	1.2578
$X'_q$	0.0969	0.1969	0.25
$T'_{do}$	8.96	6.0	5.89
$T'_{qo}$	0.31	0.535	0.6

En la Fig. 2 se muestra una comparativa del perfil de voltajes por nodo de nuestro sistema de prueba, tanto en flujos óptimos de potencia como con la incorporación de nuestra restricción de estabilidad ante pequeños disturbios donde podemos observar una disminución en dichos valores, adicional a ello se muestran los valores obtenidos mediante flujos de potencia tomados del libro [4].

Es de importancia aclarar que para ambos casos se utilizó una restricción para este valor donde el voltaje mínimo permitido es de 0.95 y el voltaje máximo permitido es de 1.05 en p.u.

8

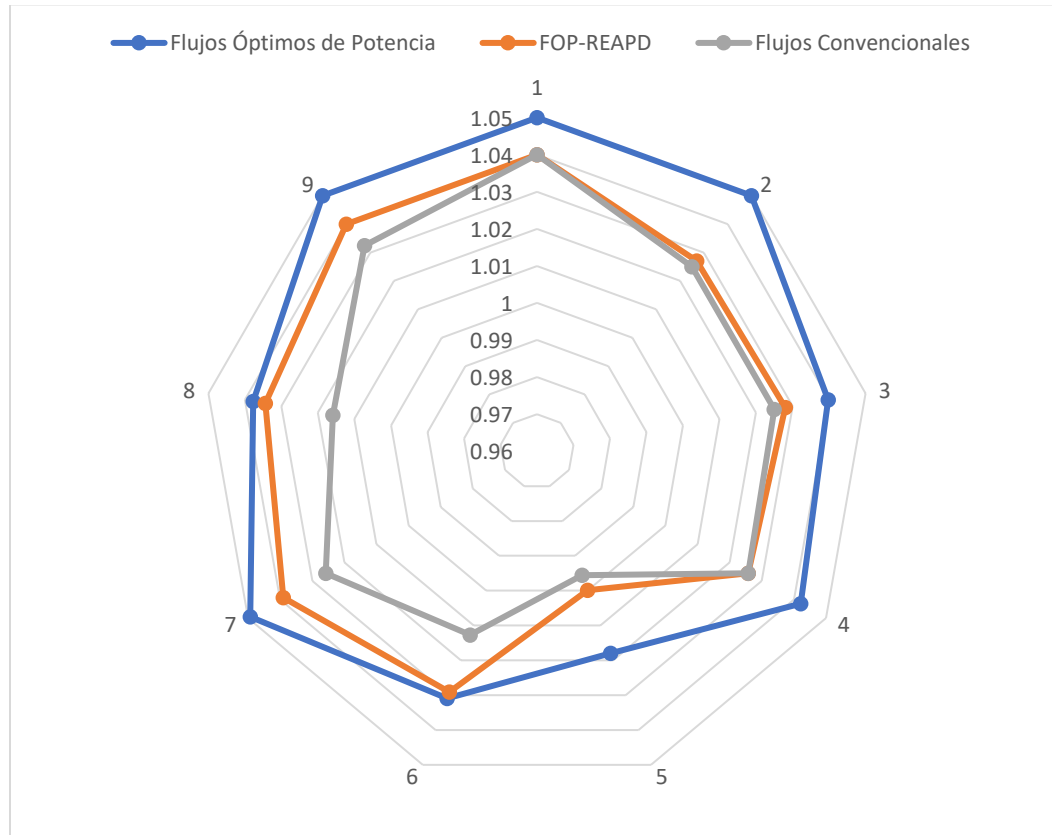


Fig. 2. Perfil de voltajes nodales.

En la Tabla 3 se muestra la comparativa de resultados, obtenidos de este mismo sistema de prueba, mediante una subrutina elaborada en el software Matlab, de los eigenvalores ( $\lambda = \alpha \pm j\omega$ ) y la razón de amortiguamiento ( $\zeta$ ) relacionados a las máquinas de nuestro sistema.

TABLA 3. VALORES DE RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO Y EIGENVALORES

FOP-REAPD		FOP	
Eigenvalores	$\zeta$	Eigenvalores	$\zeta$
-0.5908 + 2.8611i	0.2022	-0.5182 + 1.7801i	0.2795
-0.5908 - 2.8611i		-0.5182 + 1.7801i	
-0.2918 + 7.3111i	0.0398	-0.2257 + 9.5491i	0.0236
-0.2918 - 7.3111i		-0.2257 - 9.5491i	
-0.0508	1.0000	-0.0429	1.0000
-0.1868	1.0000	-0.0972	1.0000
-0.0944	1.0000	-0.0620	1.0000

El cálculo de la razón de amortiguamiento se hace de la siguiente forma:

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (18)$$

Continuando con la simulación de nuestro sistema, para realizar una perturbación en el modelo donde ya incluimos nuestra restricción de estabilidad, se le varió el porcentaje de demanda en un  $\pm 10\%$  dando como resultado un punto de operación distinto en cada porcentaje de demanda (90%, 100% y 110%), este cambio se propone con el fin de analizar los datos obtenidos al aumentar o disminuir la demanda, se puede hacer con otro porcentaje diferente pero la tendencia que se espera en los resultados es la misma, siempre tomando en cuenta la capacidad de las máquinas conectadas al sistema pues al sobrepasar el límite el problema no converge.

En la Fig. 3 se muestran los resultados de la potencia activa de cada generador, lo que nos muestra un DE diferente en cada caso, es de importancia mencionar que en el caso de la simulación del pequeño disturbios se modifica la demanda de potencia activa y reactiva pero en nuestros resultados solo se muestran los resultados de potencia activa ya que es la variable que está ligada a nuestra función objetivo y es directamente responsable de una disminución o un incremento en el costo de generación de nuestro sistema.

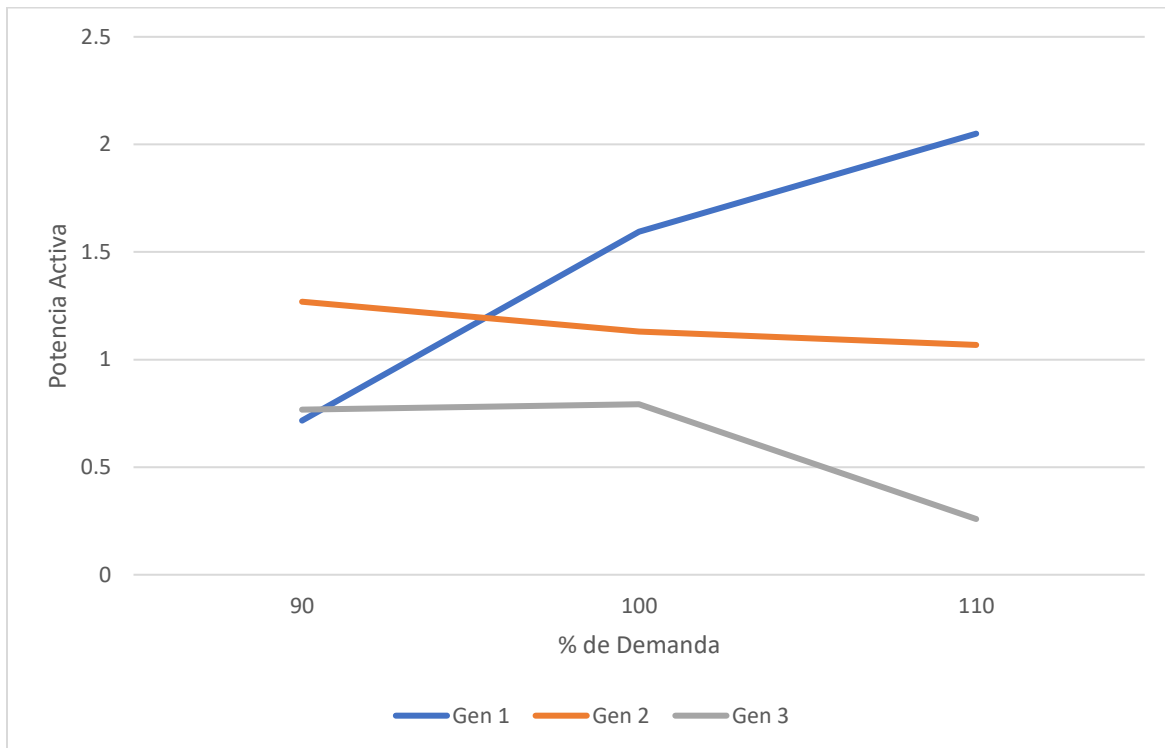


Fig. 3. Potencia activa con variación porcentual en la demanda.

En la Tabla 4 tenemos la función de costos utilizada para la solución de los flujos óptimos, la cual se divide en los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  los cuales son sustituidos en nuestra función objetivo para obtener el precio total operativo de cada generador, el cual depende del punto de operación calculado.

TABLA 4  
COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN DE COSTOS

Numero de máquina	Función de costos		
	$a$	$b$	$c$
1	140.0000	2.0000	0.0060
2	120.0000	1.5000	0.0075
3	80.0000	1.8000	0.0070

En la Fig. 4 se muestra el costo de generación para cada porcentaje de demanda de la simulación del pequeño disturbio, donde podemos observar que la máquina 3 a pesar de ser la más económica como se muestra en la Tabla 4 es la que menos potencia suministra y esto está ligado a la poca inercia ( $H$ ) que tiene dicha máquina lo cual se puede observar en la Tabla 2, por lo que vemos la relación que tiene el punto de operación con el costo operativo proporcionado con el problema FOP-REAPD.

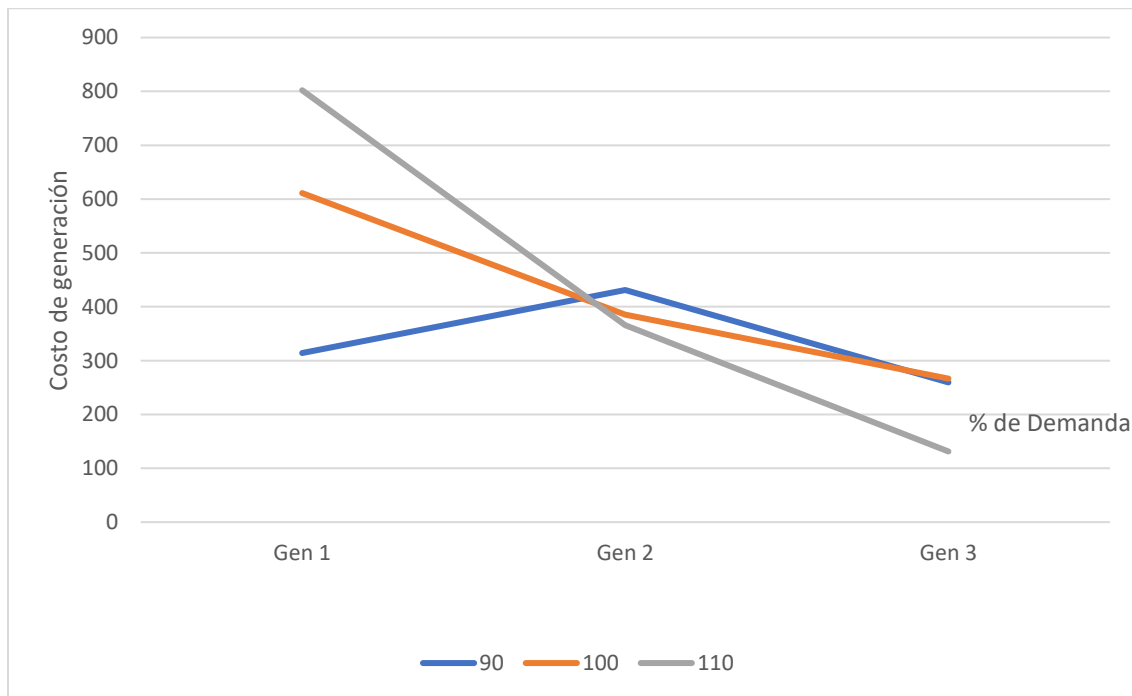


Fig. 4. Costo de generación por % de demanda.

En la figura 5 se muestra el costo de generación por cada uno de los generadores conectados a nuestro sistema, por la función de costos utilizada en esta simulación sabemos que el generador 1 es el más costoso y el que mayor inercia tiene por lo que hace al sistema más estable, al incluir nuestra restricción ante pequeños disturbios nuestro punto de operación dado cambia, suministrando la mayor potencia con este generador por lo cual se eleva el costo del DE.



Fig. 5. Costo de generación por generador.

#### IV. CONCLUSIONES

La restricción de estabilidad ante pequeños disturbios incorporada en el problema de flujos de potencia nos garantiza que el sistema sea estable lo cual se demuestra en este artículo con el primer método de Lyapunov el cual nos dice que la estabilidad en un sistema lineal está dada por las raíces de la ecuación característica del sistema, estas raíces son extraídas como eigenvalores de la matriz  $A_{sis}$  y si todos tienen parte real negativa, el sistema linealizado es asintóticamente estable en el punto de equilibrio.

En la Tabla 1 se muestra que la parte real de los eigenvalores es negativa y en comparativa se observa un recorrimiento de los valores cuando se incorpora la restricción de cuando no está presente, así mismo se nota un cambio en los valores de amortiguamiento del sistema llevándolos a un valor cercano a otra restricción ante pequeños disturbios dada en el artículo [16], estas simulaciones son de relevancia para comprobar el comportamiento de los sistemas y aumentar la seguridad del mismo evitando problemas relacionado con la estabilidad sin hacer uso de controles como el PSS aunque como se mencionó anteriormente de ninguna forma esta técnica lo sustituye.

La incorporación de esta restricción trae como consecuencia un nuevo punto de operación con un redespacho de la potencia suministrada por los generadores que resulta en un aumento en el costo de operación del sistema y una caída en los voltajes nodales siempre dentro de los límites de seguridad dados, en este trabajo se muestran resultados restringidos a un solo sistema pero la metodología mostrada puede ser llevada a un sistema de mayor magnitud aunque se espera que el tiempo de solución del algoritmo se eleve dependiendo del tamaño del sistema.

De nuestros resultados observamos cómo influye nuestra restricción en el costo de generación ya que en comparativa si tomamos como referencia el costo de generación con FOP únicamente el problema FOP-REAPD incrementa un 11% el costo.

Por último, al perturbar el sistema cambiando el porcentaje de la demanda comprobamos como la potencia suministrada por cada generador tiende a cambiar originando una disminución o incremento respectivamente en el costo de operación cuando se incrementa la demanda en un 10% el costo de generación incrementa un

2%, ya que al cambiar el punto de operación tenemos como resultado un suministro de potencia mayor en el generador más costoso y esto eleva el precio total de generación, caso contrario cuando la demanda se disminuye en un 10% y el costo de operación baja un 20.5% con esta restricción aumenta la confiabilidad del sistema ante un posible pequeño disturbio pues como se mencionó anteriormente en la Tabla 1 existe un recorrimiento de la parte real negativa de los eigenvalores.

## REFERENCIAS

- [1] R. Zarate Minano, F. Milano, A. J. Conejo, "An OPF Methodology to Ensure Small Signal Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1050-1061, 2011.
- [2] P. Li, H. Wei, B. Li, Y. Yang, "Eigenvalue Optimisation Based Optimal Power Flow with Small Signal Stability Constraints," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 5, pp. 440-450, 2013.
- [3] Y. Xu, Z. Yang Dong, R. Zhang, Y. Xue, D. Hill, "A Decomposition-Based Practical Approach to Transient Stability-Constrained Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, 2015.
- [4] P. W. Sauer, M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [5] F. Milano, I. Dassios, "Primal and Dual Generalized Eigenvalue Problems for Power Systems Small-Signal Stability Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4626-4635, 2017.
- [6] S. Lewis, *The Mathematics of Eigenvalue Optimization*, 1996, [http://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2003/04/640.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2003/04/640.pdf)
- [7] S. Lewis, M. I. Overton, *Eigenvalue Optimization*, pp. 149-190, 1996, [http://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2003/04/640.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2003/04/640.pdf)
- [8] B. F. Wolleberg, G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation and Control*, New Jersey: Wiley, 2014.
- [9] S. Chee-Khian "Interior point method on semi-definite linear complementarity problems using the Nesterov-Todd (NT) search direction: polynomial complexity and local convergence," *Computational Optimization and Applications*, Springer, 2019.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [11] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, New York: IEEE Press, 1994.
- [12] M. J. Todd, *Semidefinite Optimization*, pp. 515-560, 2001.
- [13] E. Catsigeras, *Teoría cualitativa de las ecuaciones diferenciales*, 1998, <https://www.fing.edu.uy/~eleonora/cualitativo/cual1.pdf>
- [14] S. Singhvi, S. M. Halpin, "Small Signal Stability of an Unregulated Power System," 2007 *Thirty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 32-36, 2007.
- [15] R. Fourer, D. M. Gay, B. W. Kernighan, *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*, USA: Duxbury Thomson, 2003.
- [16] X. Quin, W. Liu, Y. Yang, J. Yang, "Small-signal stability constrained optimal power flow based on real-time data," *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, China, 2015