

Volumen 7, Número 23 - Abril - Junio - 2020

ISSN 2410-3454

Revista de  
Aplicaciones de la  
**Ingeniería**

**ECORFAN®**

## **ECORFAN-Bolivia**

### **Editor en Jefe**

JALIRI-CASTELLON, María Carla  
Konradis. PhD

### **Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

### **Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

### **Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

### **Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

### **Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

### **Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

### **Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

**Revista de Aplicaciones de la Ingeniería**, Volumen 7, Número 23, de Abril a Junio, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN - Bolivia. 21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre – Bolivia. WEB: [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editor en Jefe: JALIRI-CASTELLON, María Carla Konradis. PhD. ISSN-2410-3454. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD. Actualizado al 30 de Junio de 2020.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional de Derecho de Autor.

# **Revista de Aplicaciones de la Ingeniería**

## **Definición del Research Journal**

### **Objetivos Científicos**

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Ingeniería y Tecnología, en las Subdisciplinas de ingeniería civil, ingeniería de sistemas, ingeniería de telecomunicaciones, ingeniería electrónica, ingeniería energética, ingeniería hidráulica, ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería, metalúrgica geológica, ingeniería minera, ingeniería naval, ingeniería nuclear, Ingeniería petrolera y petroquímica, Ingeniería química.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

### **Alcances, Cobertura y Audiencia**

Revista de Aplicaciones de la Ingeniería es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Bolivia, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de ingeniería civil, ingeniería de sistemas, ingeniería de telecomunicaciones, ingeniería electrónica, ingeniería energética, ingeniería hidráulica, ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería, metalúrgica geológica, ingeniería minera, ingeniería naval, ingeniería nuclear, Ingeniería petrolera y petroquímica, Ingeniería química con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ingeniería y Tecnología. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

## **Consejo Editorial**

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD  
Universidad Politécnica de Madrid

DE LA ROSA - VARGAS, José Ismael. PhD  
Universidad París XI

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD  
Universidad Politécnica de Valencia

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD  
Institute of Technology

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD  
Universidad Gestalt

LARA - ROSANO, Felipe. PhD  
Universidad de Aachen

LÓPEZ - HERNÁNDEZ, Juan Manuel. PhD  
Institut National Polytechnique de Lorraine

LÓPEZ - LÓPEZ, Aurelio. PhD  
Syracuse University

MEJÍA - FIGUEROA, Andrés. PhD  
Universidad de Sevilla

ROBLEDO - VEGA, Isidro. PhD  
University of South Florida

## **Comité Arbitral**

BAUTISTA - VARGAS, María Esther. PhD  
Universidad Autónoma de Tamaulipas

ALCALÁ - RODRÍGUEZ, Janeth Aurelia. PhD  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

ALONSO - CALPEÑO, Mariela J. PhD  
Instituto Tecnológico Superior de Atlixco

ÁLVAREZ - GUZMÁN, Eduardo. PhD  
Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

FERREIRA - MEDINA, Heberto. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GARCÍA - VALDEZ, José Mario. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

GONZÁLEZ - LÓPEZ, Juan Miguel. PhD  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

GONZALEZ - MARRON, David  
Instituto Tecnológico de Pachuca

LICEA - SANDOVAL, Guillermo. PhD  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

ZAVALA - DE PAZ, Jonny Paul. PhD  
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada

URBINA - NAJERA, Argelia Berenice. PhD  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

## **Cesión de Derechos**

El envío de un Artículo a Revista de Aplicaciones de la Ingeniería emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Bolivia considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.

## **Declaración de Autoría**

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

## **Detección de Plagio**

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandara a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

## **Proceso de Arbitraje**

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

## **Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación**

### **Área del Conocimiento**

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de ingeniería civil, ingeniería de sistemas, ingeniería de telecomunicaciones, ingeniería electrónica, ingeniería energética, ingeniería hidráulica, ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería, metalúrgica geológica, ingeniería minera, ingeniería naval, ingeniería nuclear, ingeniería petrolera y petroquímica, ingeniería química y a otros temas vinculados a la Ingeniería y Tecnología.

## **Presentación del contenido**

En el primer artículo presentamos *Modelo del transformador monofásico en el dominio de la frecuencia*, por ESCAMILLA-SÁNCHEZ, Juan Carlos, MORALES-AGUILAR, Eric, CANDIA-GARCÍA Filiberto, MAR, José Luis y MARTINEZ, Daniel F., con adscripción en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y Universidad de Colima respectivamente, como segundo artículo presentamos *Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos*, por NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemi, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, KANTUN-UICAB, María Cristina y TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, con adscripción en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, como tercer artículo presentamos *Adquisición de datos de enfriamiento con termopar tipo k para probetas de acero inoxidable en la plataforma Arduino*, por NÚÑEZ-ARIZA, Benjamín, NÚÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemí, YÁÑEZ-VARGAS, Juan Israel y KANTUN-UICAB, María Cristina, con adscripción en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, como cuarto artículo presentamos *Sistema mecatrónico emulador de movimientos de la ATM*, por CORTÉS RAMÍREZ, Ulises & CASTAÑEDA ESPINOZA, Angélica, con adscripción en la Universidad Tecnológica de Huejotzingo.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Modelo del transformador monofásico en el dominio de la frecuencia</b> ESCAMILA-SÁNCHEZ, Juan Carlos, MORALES-AGUILAR, Eric, CANDIA-GARCÍA Filiberto, MAR, José Luis y MARTINEZ, Daniel F. <i>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</i> <i>Universidad de Colima</i>	1-6
<b>Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos</b> NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemi, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, KANTUN-UICAB, María Cristina y TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio <i>Universidad Politécnica de Juventino Rosas</i>	7-18
<b>Adquisición de datos de enfriamiento con termopar tipo k para probetas de acero inoxidable en la plataforma Arduino</b> NUÑEZ-ARIZA, Benjamín, NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemí, YÁÑEZ-VARGAS, Juan Israel y KANTUN-UICAB, María Cristina <i>Universidad Politécnica de Juventino Rosas</i>	19-23
<b>Sistema mecatrónico emulador de movimientos de la ATM</b> CORTÉS RAMÍREZ, Ulises & CASTAÑEDA ESPINOZA, Angélica <i>Universidad Tecnológica de Huejotzingo</i>	24-33



## Modelo del transformador monofásico en el dominio de la frecuencia

### Single phase transformer model in the frequency domain

ESCAMILLA-SÁNCHEZ, Juan Carlos<sup>†\*</sup>, MORALES-AGUILAR, Eric, CANDIA-GARCÍA Filiberto, MAR, José Luis y MARTINEZ, Daniel F.

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Universidad de Colima*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Juan Carlos, Escamilla-Sánchez* / CVU CONACYT ID: 230175

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Eric, Morales-Aguilar* / CVU CONACYT ID: 225102

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Filiberto, Candia-García* / CVU CONACYT ID: 264231

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *José Luis, Mar*

ID 4<sup>to</sup> Coautor: *Daniel F., Martínez*

DOI: 10.35429/JEA.2020.23.7.1.6

Recibido: 25 de Abril, 2020; Aceptado: 20 de Mayo, 2020

#### Resumen

En este artículo se presenta un modelo en el dominio de la frecuencia para el análisis de la transferencia de sobrevoltajes transitorios inducidos al secundario de un transformador monofásico, así como la distribución del voltaje transitorio a lo largo de ambos devanados. El transformador se modela como un elemento de parámetros distribuidos a partir de las ecuaciones del telegrafista en el dominio de la frecuencia. Para obtener la solución en el dominio del tiempo se emplea la Transformada Numérica de Laplace (TNL).

**Modelado del transformador, Transformada Numérica de Laplace, transitorios electromagnético**

#### Abstract

This article presents a model in the frequency domain for the analysis of the transient induced overvoltage transfer to the secondary of a single-phase transformer, as well as the distribution of the transient voltage along both windings. The transformer is modeled as an element of distributed parameters from the telegraphist's equations in the frequency domain. The Laplace Numerical Transform (TNL) is used to obtain the solution in the time domain.

**Transformer modeling, Laplace Numerical Transform, electromagnetic transients**

**Citación:** ESCAMILLA-SÁNCHEZ, Juan Carlos, MORALES-AGUILAR, Eric, CANDIA-GARCÍA Filiberto, MAR, José Luis y MARTINEZ, Daniel F. Modelo del Transformador Monofásico en el Dominio de la Frecuencia. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2020. 7-23: 1-6.

\* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: escamilla\_14@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El estudio y comportamiento de los sobrevoltajes transitorios en el transformador han sido tópicos de gran interés e importancia en el área de ingeniería de potencia (Al-fuhaid, 2001), (Saied & Al-fuhaid, 1985), (Saied & Al-fuhaid, 2004), (Liang, Sun, Zhang, & Cui, 2006), (Shibuya, Fijita, & Hosokawa, 1997), (Dang & Ridriguez, 1999), (Honorati & Santini, 1990). Para el análisis de transitorios de altas frecuencias, generados tanto por descargas atmosféricas como por maniobras o fallas, se emplean modelos denominados internos, los cuales describen principalmente la distribución del potencial y la propagación en el devanado primario. Para ello, se emplean tanto representaciones de parámetros concentrados como de parámetros distribuidos.

Entre diversas técnicas de análisis, la teoría de la línea multiconductora en el dominio de la frecuencia se ha utilizado para el análisis de los sobrevoltajes transitorios en los devanados del transformador (Al-fuhaid, 2001), (Saied & Al-fuhaid, *Electromagnetic transient in a Line Transformer Cascade by a Numerical Laplace Transform Technique*, 1985), (Shibuya, Fijita, & Hosokawa, 1997). Por ejemplo, uno de los modelos basados en esta teoría describe el devanado completo del transformador mediante un modelo de parámetros distribuidos de la línea monofásica, y para el análisis a detalle del fenómeno utiliza un modelo de la línea multiconductora en las primeras vueltas (Shibuya, Fijita, & Hosokawa, 1997). Otro modelo del transformador en el dominio de la frecuencia consiste en obtener una ecuación diferencial ordinaria (EDO) cuya solución es calculada por el método numérico de Runge Kutta y describe el comportamiento del devanado del transformador ante sobrevoltajes (Dang & Ridriguez, 1999).

En este artículo se emplea un modelo del transformador para altas frecuencias (primordialmente descargas atmosféricas). A diferencia de los modelos usados generalmente, este modelo considera también la transferencia de sobrevoltajes transitorios al lado secundario. La naturaleza distribuida de los parámetros eléctricos del transformador se describe a partir de las ecuaciones del telegrafista comúnmente empleadas en el análisis de la línea de transmisión.

A partir de estas ecuaciones se obtiene un modelo de 2 puertos (nodal o matriz de admitancias) del transformador. Se incluye un ejemplo de aplicación en el cual se analiza la distribución de sobrevoltajes transitorios a lo largo de los devanados primario y secundario de un transformador de distribución, Para obtener la solución en el dominio del tiempo se emplea la Transformada Numérica de Laplace (TNL) (Vahidi, 2005).

## Modelo del transformador

La representación circuital del transformador para una unidad de longitud se presenta en la Fig. 1 (Al-fuhaid, 2001). El modelo considera las siguientes aproximaciones: Se asumen devanados distribuidos uniformemente. Los parámetros del transformador se asumen constantes. La operación es considerada en la región lineal de la curva de magnetización. La inductancia mutua es considerada únicamente entre la vuelta del devanado primario que corresponde con la del secundario. Del circuito de la Fig.1 se obtienen los cambios de voltaje en los devanados dados por.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1(x, s) \\ \Delta V_2(x, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1(s)\Delta x & Z_m(s)\Delta x \\ Z_m(s)\Delta x & Z_2(s)\Delta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_1(x, s) \\ \hat{I}_2(x, s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $\hat{I}_1(x, s)$  y  $\hat{I}_2(x, s)$  son las corrientes fluyendo en Z1 y Z2 respectivamente,  $Z_m$  es la impedancia de acoplamiento magnético entre devanados. Se tiene entonces las siguientes definiciones:

$$Z_1(s) = R_1 + sL_1 \quad (2a)$$

$$Z_2(s) = R_2 + sL_2 \quad (2b)$$

$$Z_m(s) = sL_m \quad (2c)$$

Expresando estas corrientes en función de la corriente total del devanado, dividiendo entre  $\Delta x$  y aplicamos el límite cuando  $\Delta x \rightarrow 0$ , se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_1(x, s)}{dx} \\ \frac{dV_2(x, s)}{dx} \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_1 Y_2 Z_2 - Z_m^2 Y_2 & Z_m \\ Z_m & Z_2 + Z_2 Y_1 Z_1 - Z_m^2 Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(x, s) \\ I_2(x, s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

$$D(s) = 1 + Z_1 Y_1 + Z_2 Y_2 + Z_1 Z_2 Y_1 Y_2 - Z_m^1 Y_1 Y_2 \quad (4a)$$

$$Y_1(s) = sC_1 + 1/R_{c1} \quad (4b)$$

$$Y_2(s) = sC_2 \quad (4c)$$

Escribiendo la variación de corrientes respecto a  $\Delta x$  del devanado primario y del secundario, dividiendo entre  $\Delta x$  y aplicando los límites cuando  $\Delta x \rightarrow 0$  se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_1(x,s)}{dx} \\ \frac{dI_2(x,s)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{g1}(s) + Y_m(s) & -Y_m \\ -Y_m & Y_{g2}(s) + Y_m(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(x,s) \\ V_2(x,s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde:

$$Y_{g1}(s) = sC_{g1}, Y_m(s) = sC_m \text{ y } Y_{g2}(s) = sC_{g2} \quad (6abc)$$

Las ecuaciones (3) y (5) en forma compacta se pueden escribir como.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV(x,s)}{dx} \\ \frac{dI(x,s)}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{Z}(s) \\ \mathbf{Y}(s) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(x,s) \\ I(x,s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$V(x,s)$  e  $I(x,s)$  son los vectores de voltaje y de corriente en el dominio de Laplace en el punto  $x$  del devanado, mientras que  $Z(s)$  y  $Y(s)$  son las matrices de impedancias y admitancias descritas en las ecuaciones (3) y (5). Las ecuaciones acopladas de primer orden definidas en (7) pueden convertirse en ecuaciones desacopladas de segundo orden:

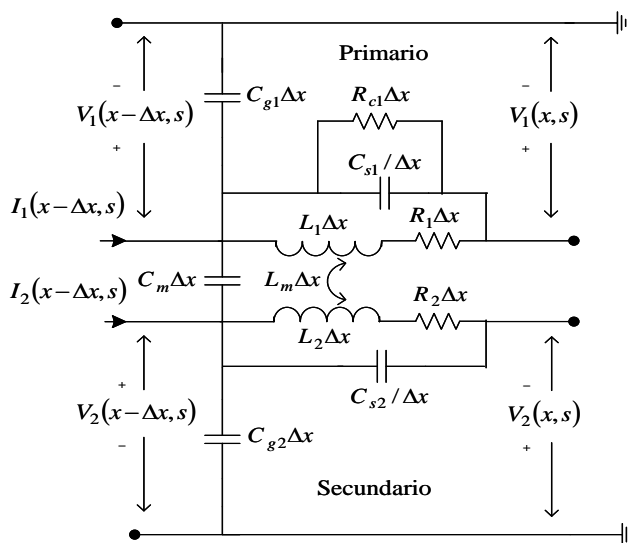


Figura 1 Representación para un diferencial de longitud del transformador

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 \mathbf{V}(x,s)}{dx^2} \\ \frac{d^2 \mathbf{I}(x,s)}{dx^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}(s)\mathbf{Y}(s) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}(s)\mathbf{Y}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(x,s) \\ \mathbf{I}(x,s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

La solución general del sistema definido en (8) está dada por:

$$\mathbf{V}(x,s) = \exp(-\Psi x) \mathbf{C}_1 + \exp(\Psi x) \mathbf{C}_2 \quad (9a)$$

$$\mathbf{I}(x,s) = \mathbf{Y}_0 [\exp(-\Psi x) \mathbf{C}_1 - \exp(\Psi x) \mathbf{C}_2] \quad (9b)$$

Donde  $\Psi x$  es la matriz de constantes de propagación del devanado, la cual esta en función de los vectores y valores propios, definida como:

$$\Psi x = \mathbf{M} \sqrt{\lambda} \mathbf{M}^{-1} \quad (10)$$

$\mathbf{M}$  y  $\lambda$  son las matrices de vectores y valores propios del producto  $\mathbf{Z}(s)\mathbf{Y}(s)$ , respectivamente, y  $\mathbf{Y}_0$  es la matriz de admitancias características del devanado, calculada como sigue:

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{Z}(x,s)^{-1} \Psi x \quad (11)$$

Aplicando las condiciones de frontera de Dirichlet, se considera  $x = 0$  y  $x = L$  en (9a) y (9b), puede obtenerse el modelo de 2 puertos conocido como forma nodal o de matriz de admitancias (Fig. 2):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}(0,s) \\ \mathbf{I}(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{B} \\ -\mathbf{B} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}(0,s) \\ \mathbf{V}(L,s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_0 \coth(\Psi x L) \quad (13a)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Y}_0 \operatorname{csch}(\Psi x L) \quad (13b)$$

A partir del modelo de 2 puertos se obtienen los voltajes en las terminales del transformador en el dominio de la frecuencia. Los valores respectivos en el dominio del tiempo se obtienen a partir del algoritmo de Transformada Numérica de Laplace, descrito en la siguiente sección.

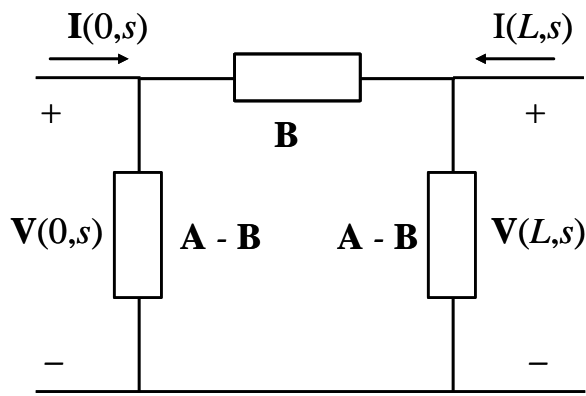


Figura 2 Modelo de 2 puertos del transformador

### Ejemplo de Aplicación

Un transformador monofásico de 15 MVA, 34.5./13.8 KV 60Hz es utilizado para mostrar la técnica descrita. Los parámetros de transformador por unidad de longitud son los siguientes:

Devanado Primario:	Devanado Secundario:
$R_1 = 0.22 \Omega$	$R_2 = 0.0366 \Omega$
$R_{s1} = 130 K\Omega$ ,	$L_{s2} = 1.18 mH$
$L_{s1} = 7.35mH$	$C_{g2} = 27nF$
$C_{g1} = 9nF$ .	

Para ambos devanados se asume que

$$\frac{\alpha^2}{l^2} = \frac{C_{gk}}{C_{sk}} = 10 \quad (18)$$

La inductancia mutua es  $L_m = 2.8 mH$  y la capacitancia mutua es  $C_m = 148 pF$ . En el lado del primario del transformador se suministra una señal de tipo escalón unitario. La longitud del devanado analizada es de 10 metros ( $L=10m$ ), dividida en 4 segmentos, tal como se muestra en la Fig. 3. En dicha figura las secciones se clasifican como:

A= Escalón suministrado al inicio del devanado primario

B= Voltaje transitorio a 1/4 del devanado

C= Voltaje transitorio a 2/4 del devanado

D= Voltaje transitorio a 3/4 del devanado

En la Fig. 4 se observan los sobrevoltajes transitorios presentes en los diferentes segmentos del devanado primario, mientras que en la Fig. 5 se presentan los sobrevoltajes transferidos al secundario.

En el instante de incidencia del impulso prácticamente sólo las capacitancias del circuito reaccionan al escalón suministrado. La distribución de potencial en dicho instante (distribución inicial) se observa en la Fig. 6, la cual se obtiene en un tiempo  $t=0.1\mu s$ . En el devanado primario el comportamiento es exponencial decreciente, mientras que en el secundario es prácticamente cero, es decir, aún no hay transferencia a considerar. Conforme aumenta el tiempo los elementos inductivos del devanado se involucran en el fenómeno y se presenta el sobrevoltaje transitorio. En la Fig. 6 también muestra la distribución de potencial para un tiempo  $t=0.297ms$  en el cual se alcanza el máximo sobrevoltaje. Se observa también que dicho máximo se presenta en aproximadamente el 30% de la longitud para ambos devanados (1.46 p.u. en el primario y 0.61 p.u. en el secundario, con los valores por unidad referidos al primario). Al final del evento transitorio los elementos resistivos gobiernan la respuesta del circuito, por lo que la transferencia de potencial se comporta de manera lineal. En la Fig. 7 se grafica el comportamiento de la distribución de potencial ante la variación de la magnitud de  $\alpha$ , considerando el tiempo en que se presenta el máximo sobrevoltaje en cada caso. Idealmente, con  $\alpha \rightarrow 0$ , el transitorio prácticamente no se presenta. El sobrevoltaje transitorio en ambos devanados se atenuará entonces reduciendo  $C_{gk}$  o nulificándola parcial o totalmente, o bien, incrementando la capacitancia serie  $C_s$ .

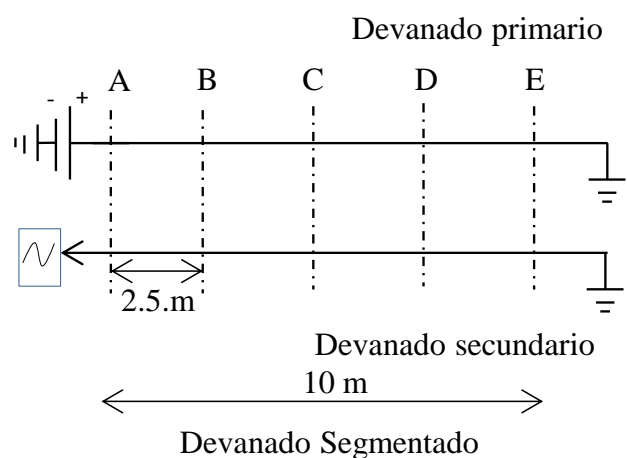
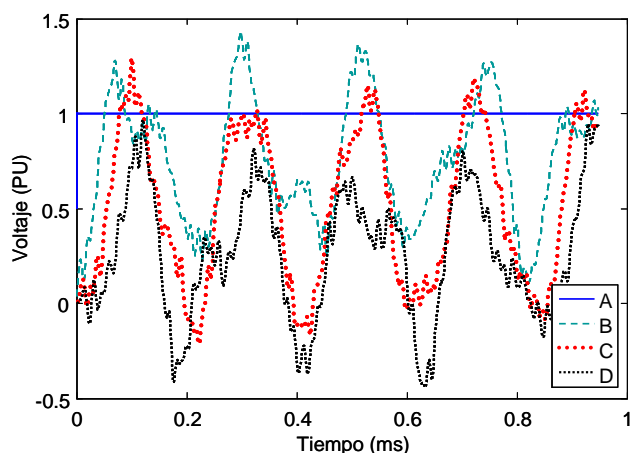
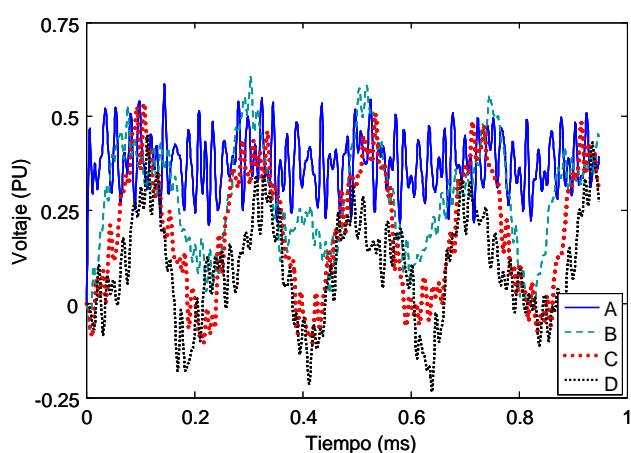


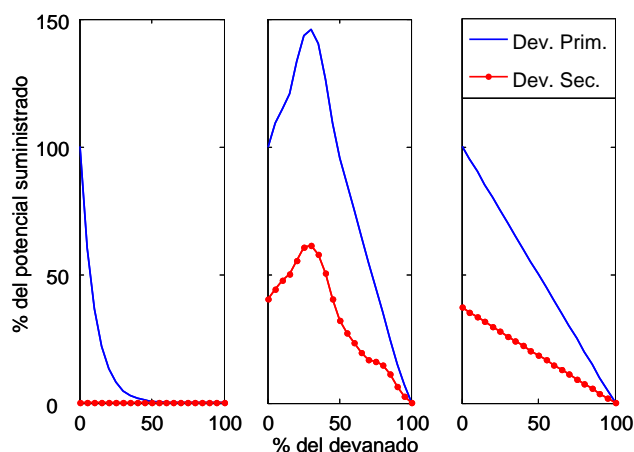
Figura 3 Diagrama para el ejemplo de aplicación



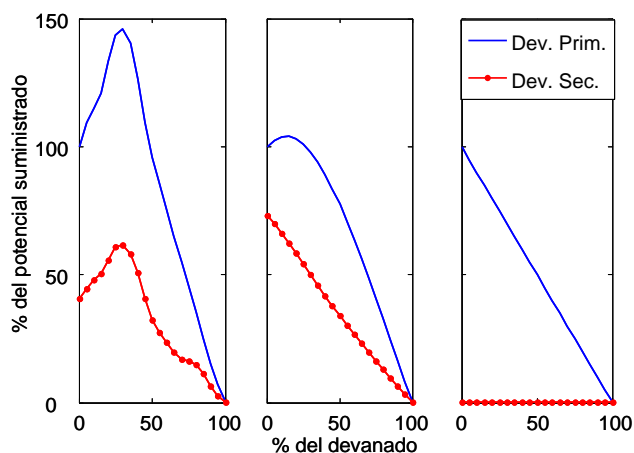
**Figura 4** Voltaje transitorio a lo largo del devanado primario para  $\alpha = 10$



**Figura 5** Voltaje transitorio a lo largo del devanado secundario



**Figura 6** Distribución de Potencial



**Figura 7** Distribución de Potencial (máximo) con diferentes valores de  $\alpha$

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y a la Universidad de Colima campus Manzanillo por otorgar las facilidades para la presentación de este trabajo.

### Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un modelo en el dominio de la frecuencia para analizar el comportamiento de la propagación y transferencia de sobrevoltajes en los devanados de un transformador. El modelo se basa en la solución de las ecuaciones de telegrafista en el dominio de la frecuencia, utilizando parámetros del transformador obtenidos de su geometría. Además de las curvas de distribución de potencial en el devanado primario obtenidas por modelos internos típicos, mediante este modelo es posible obtener también la distribución de potencial transferido al secundario. La forma en la cual una onda de alta frecuencia se transfiere al secundario del transformador es de alta importancia práctica. Podría determinar, por ejemplo, la descarga que aparece en un bus de generación cuando una onda incide en las terminales de alto voltaje de un transformador elevador.

### Referencias

Al-fuhaid, A. S. (2001). Frequency Characteristics of Single Phase Two Winding Transformer Using Distributed Parameter Modeling. *IEEE Trans. Power Delivery*, 637-642.

Dang, H., & Ridriguez , H. (1999). Behavior of transformer windings under voltages. *High Voltage Engineering Symposium* (págs. 1287-1290). IEE Conference Publication.

Honorati, O., & Santini, E. (1990). New approach to the analysis of impulse voltage distribution in transformer windings. *IEE*, 283-290.

Liang, G., Sun, H., Zhang, X., & Cui, X. (2006). Modeling of Transformer Windings Under Very Fast Transient Overvoltages. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, 1 - 7.

Saied , M., & Al-fuhaid, A. S. (1985). Electromagnetic transient in a Line Transformer Cascade by a Numerical Laplace Transform Technique. *IEEE Trans. On Power Apparatus and System*, 2901-2909.

Saied, M., & Al-fuhaid, A. (2004). Frequency Response of Two-Winding Transformers Obtained by a Distributed –Parameter s-Domain Method. *Electric Power Components an systems*, 755-766.

Shibuya, Y., Fijita, S., & Hosokawa, N. (1997). Analysis of very Fast Transient overvoltages in transformer windings. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distribution*, 1 - 7.

Vahidi, B. (2005). Using Pspice in Teaching Impulse Voltage Testing of Power Transformer to Senior Undergraduate Students. *IEEE Transaction on Education*, 1 - 7.

## Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos

### Methodology for the design of shell and tube heat exchangers

NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemi†\*, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio', KANTUN-UICAB, Maria Cristina'' y TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio'

*'Universidad Politécnica de Juventino Rosas. Academia de Ingeniería Metalúrgica. Hidalgo 102, Comunidad Valenciana, Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto, México.*

*''Universidad Politécnica de Juventino Rosas. Academia de Ingeniería en Plásticos. Hidalgo 102, Comunidad Valenciana, Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Lourdes Nohemi, Nuñez-Hernández* / ORC ID: 0000-0002-3684-7700, CVU CONACYT ID: 1017764

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Juan Gregorio, Hortelano-Capetillo* / ORC ID: 0000-0002-3702-4853, CVU CONACYT ID: 347496

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Maria Cristina, Kantun-Uicab* / ORC ID: 0000-0003-1588-5414, CVU CONACYT ID: 162342

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Jorge Sergio, Téllez-Martínez* / ORC ID: 0000-0003-0587-0059, CVU CONACYT ID: 40084

DOI: 10.35429/JEA.2020.23.7.7.18

Recibido: 15 de Abril, 2020; Aceptado: 29 de Junio, 2020

#### Resumen

Los intercambiadores de calor han sido objeto de estudio por más de una centuria. Su clasificación ha abierto diversas ramas de estudio. Dentro de los equipos denominados recuperadores se encuentran los de tipo carcasa y tubos. Estos equipos se utilizan para realizar procesos de refrigeración y calentamiento a partir de circuitos hídricos. Aunque el agua no es la única sustancia de interés, un gran número de trabajos de investigación abordan el comportamiento hidrodinámico acoplado a procesos de intercambio de calor en elementos de diferentes tamaños, con varios arreglos de flujo y de diversos tipos, tal que se desea caracterizarlos en función del desempeño térmico para alcanzar principalmente, alguna temperatura objetivo en los fluidos involucrados, aun cuando esto implique lidiar con grandes caídas de presión. De esta forma, se ha planteado la generación de herramientas computacionales que auxilien a la comprensión de la funcionalidad a ciertas condiciones de operación, así como también la fabricación con certidumbre y bajo costo. Los resultados verificados y validados de una aplicación desarrollada con recursos informáticos accesibles establecen una contribución en este campo activo de la ingeniería.

**Intercambiador de calor, procesos térmicos optimizados, simulación de recuperadores,  $\varepsilon$ -NTU**

#### Abstract

Heat exchangers have been the subject of study for over a century. Its classification has opened various branches of study. Among the equipment called recuperators are those of the casing and tube type. These equipments are used to carry out cooling and heating processes from water circuits. Although water is not the only substance of interest, a large number of research papers address hydrodynamic behavior coupled to heat exchange processes in elements of different sizes, with various flow arrangements and of various types, such that it is desired to characterize them depending on the thermal performance to mainly achieve some target temperature in the fluids involved, even when this involves dealing with large pressure drops. In this way, the generation of computational tools that help the understanding of functionality under certain operating conditions has been proposed, as well as the manufacturing with certainty and low cost. The verified and validated results of an application developed with accessible computing resources establish a contribution in this active field of engineering.

**Heat exchangers optimized thermal processes, recuperators simulation,  $\varepsilon$ -NTU**

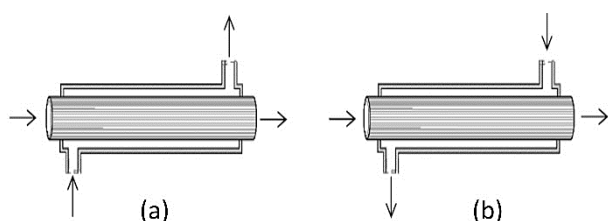
**Citación:** NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemi, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, KANTUN-UICAB, Maria Cristina y TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio. Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2020. 7-23:7-18.

\* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: lulisnun@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

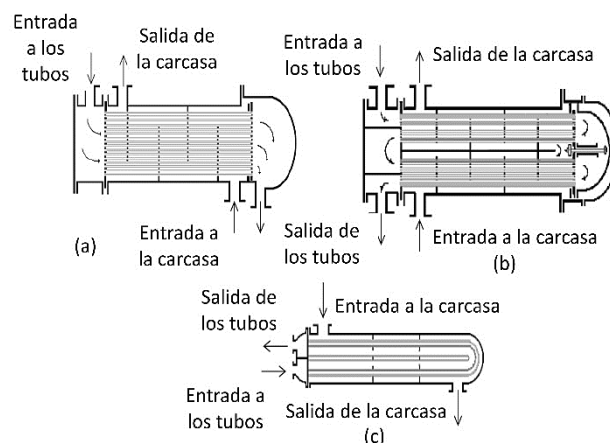
Los intercambiadores de calor tipo coraza y tubos son ampliamente usados en la industria gracias a su variedad de construcción y la aplicación que tienen en los procesos de transferencia de calor entre sustancias. La necesidad de la industria por aprovechar la energía ha impulsado tecnologías innovadoras para la fabricación de los intercambiadores de calor bajo las normas de la Asociación de Constructores de Cambiadores de Calor del tipo Tubular (TEMA de sus siglas en inglés). De acuerdo con la clase de intercambiador, estas especifican con detalle: los materiales, las técnicas de diseño, las dimensiones y los métodos de construcción. Lo anterior para determinar el buen funcionamiento mecánico y térmico, es decir, para la optimización de los procesos de transferencia de calor y ahorro de energía. Los intercambiadores de calor pueden clasificarse de acuerdo con criterios tales como la geometría de construcción, los procesos de transferencia y el arreglo de flujos de fluidos, en recuperadores y regenerativos (Kakac & Hongtan, 1998). De los recuperadores, los más sencillos se pueden definir como cuerpos cilíndricos concéntricos. Estos a su vez se clasifican en: flujo en paralelo o flujo a contracorriente, como se muestra en la Fig. 1 (a) y (b), respectivamente.



**Figura 1** Intercambiadores de calor concéntricos. Con (a) flujo en paralelo y (b) flujo a contracorriente

Fuente: Kakac & Hongtan, 1998

Otra configuración se estructura con el concepto concéntrico mediante la coraza o carcasa externa y arreglos de tubos. Tales configuraciones se distinguen de acuerdo con la circulación de los fluidos en los tubos y al interior de la carcasa, denominada “paso”. En estos intercambiadores normalmente se instalan deflectores (baffles) para aumentar la interacción del fluido al interior de la coraza con los tubos. La Fig. 2 muestra esquemáticamente algunos ejemplos con una configuración geométrica que permite distintos pasos.



**Figura 2** Intercambiadores de Calor Carcasa y Tubos. (a) Un paso por la carcasa y tubos, flujo contracorriente. (b) Dos pasos por la carcasa y cuatro pasos por los tubos. (c) Un paso por la carcasa y dos pasos por los tubos

Fuente: Kakac & Hongtan, 1998

Considerando la relevancia del control de la transferencia de calor en estos sistemas, en este trabajo se plantea una metodología de análisis y se sugiere el uso de una aplicación informática para diseñar un intercambiador de calor tipo carcasa y tubos.

Estos equipos se diseñan con grandes superficies de transmisión de calor asociadas con los diversos tubos montados paralelamente en el interior de la carcasa (Geankoplis, 1993). En relación al tamaño de estos componentes, existen ciertas limitaciones para que los equipos operen tomando en cuenta grandes caídas de presión y su efecto sobre la temperatura de los fluidos (Ozisik, 1990).

Tomando en consideración lo anterior y la información de los estándares de TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association de sus siglas en inglés) (TEMA, 2007), los esfuerzos para generar metodologías similares a la propuesta, incluyen el análisis de Mehra (1983), quien propone que los estándares de TEMA y ASME se consideren fuentes de información adecuadas para el diseño mecánico y fabricación de los intercambiadores de calor de carcasa y tubos. Con esta referencia, Keene et al. (1994) desarrollaron una aplicación computacional para el cálculo de la temperatura de fluidos para un equipo. Sus resultados fueron validados respecto a los modelos matemáticos propuestos, los cuales integraban los efectos de las caídas de presión del fluido en las secciones delimitadas por los baffles.



Por otra parte, Yusuf y Ozbilen (2004) realizaron un diseño con predicciones de un código de programación que determina la transferencia de calor óptima en función de los flujos másicos de los fluidos, su temperatura de entrada y salida al proceso, así como el tipo de material de los tubos. La información obtenida especifica las dimensiones generales del equipo como son: número de tubos, número de bafles, longitud de los tubos, diámetro interno y externo de los tubos, el área de superficie para la transferencia de calor y las caídas de presión del lado de la carcasa y del lado de los tubos. Asimismo, Leong (1998) desarrolló una aplicación computacional donde diseñan estos equipos alimentando datos de los estándares de TEMA.

La información para el cálculo requiere el conocimiento de: los flujos másicos, la temperatura de entrada y salida de los fluidos del lado de la carcasa y del lado de los tubos, algunas propiedades físicas de fluidos de trabajo como el agua, aire, freon 12, etilenglicol, glicerina y mercurio. En este trabajo se implementa el método de Bell Delaware para determinar los parámetros geométricos del intercambiador de calor (número de tubos, diámetro de la coraza, número de tubos, espaciamiento de bafles, paso pitch, número de pasos en los tubos, etc.). Los investigadores Su, Khin, y Mi (2008) también desarrollaron una aplicación computacional con el objetivo de diseñar intercambiadores como enfriadores de aceite. En su procedimiento intentan obtener la mayor transferencia de energía sin exceder la caída de presión permitida.

Al comparar sus resultados con datos de equipos industriales ajustan sus simulaciones para obtener coeficientes de transferencia de calor internos (del lado tubos) y externos (del lado carcasa) variando el número de bafles, número de tubos y la longitud de los tubos. A su vez, El-Fawal, Fahmy, & Taher (2011), generaron una aplicación computacional con el objetivo de disminuir al mínimo el costo del diseño al definir la presión óptima de los fluidos del lado de la carcasa y del lado tubos. Minimizar el costo implica mejorar el diseño de la geometría del equipo, por lo tanto, para verificar sus resultados realizan una búsqueda de datos en la literatura.

Machuca y Urresta (2008) presentaron la estructura de gráficos y datos determinados por una aplicación informática para el aprendizaje del funcionamiento de los intercambiadores de calor tipo coraza y tubos.

Esta aplicación permite modificar condiciones de diseño y de operación. Similarmente, Tan y Fok (2006) desarrollaron una herramienta informática educativa para el diseño de intercambiadores de calor tipo carcasa y tubos usando el método de Kern para análisis termo hidráulicos. En este programa de cómputo el usuario introduce las especificaciones de diseño y los resultados se muestran dibujos esquemáticos. Los investigadores El-Harbawi, Acellam, & Yin (2011), presentaron una metodología para desarrollar un programa de cómputo educativo en el lenguaje de programación Visual Basic para diseñar intercambiadores de calor coraza y tubos fundamentado en los métodos de Kern y Bell Delaware.

En el proceso de verificación de resultados se incluyen datos de manuales y de otros programas de diseño. Por su parte, Cartaxo y Fernandes (2010), generaron otro programa en la línea educativa para el diseño de equipos utilizando los métodos de Kern, Bell Delaware y Tinker, proporcionando cursos de operación con ejercicios realistas. Los parámetros que el usuario determina son: los fluidos de trabajo (34° API, 26° API), la temperatura de entradas en °F (300, 450) y salidas en °F (310, 350), los flujos másicos en  $\text{lbh}^{-1}$  (72179.79, 6900) y algunos datos geométricos como diámetros de las tuberías. Otra contribución fue originada por Reyes-Rodríguez et al. (2013), quienes realizaron una modelación térmica e hidráulica de un intercambiador de calor tipo coraza y tubos usando el método  $\epsilon$ -NTU y Bell Delaware a través de MATLAB® utilizando, además, una técnica de optimización de algoritmos genéticos para proporcionar un conjunto de Pareto de múltiples soluciones y así minimizar el costo de construcción.

En relación con la mejora de métodos matemáticos, Toledo-Velázquez et al. (2014) presentaron un estudio implementando factores de corrección del método de Bell Delaware para los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor y las caídas de presión.

Aunque el desarrollo se estructuró en FORTRAN 77 se considera una herramienta amigable, en la que el usuario introduce con facilidad parámetros de la geometría del equipo, la temperatura de entrada y las características de los fluidos. Desde el punto de vista físico, Gawande et al. (2012), diseñaron y construyeron un intercambiador de calor coraza y tubos en base a los estándares de TEMA y ASME para fines industriales. Otras referencias de construcción de equipos utilizando herramientas de optimización para disminuir los costos se detallan en las referencias (Reppicha & Zagermann, 1995), (Babua & Munawar, 2007), (Fettaka, Thibault, & Gupta, 2013), (Selbaşa, Kızılkana, & Reppich, 2006), (Caputo, Pelagagge, & Salini, 2008), (Ponce-Ortega, Serna-González, & Jiménez-Gutiérrez, 2009), (Fesangharya, Damangira, & Soleimani, 2009), (Patel & Rao, 2010), (Hilbert, Janiga, Baron, & Thévenin, 2006), (Sanaye & Hajabdollahi, 2010), (Costa & Queiroz, 2008), (Rajasekaran & Kannadasan, 2010).

## Metodología

Contribuyendo al desarrollo de aplicaciones para el diseño de equipos intercambiadores de calor tipo carcasa y tubos, se planteó la generación de una nueva aplicación de cómputo utilizando la interfaz del software ESS (Engineering Equation Solver, de sus siglas en inglés). En el algoritmo de cálculo se establece la solución a la formulación de la transferencia de calor total en el sistema planteando un balance de energía entre los fluidos del lado de la carcasa y del lado de los tubos. La Ec. 1 determina el balance.

$$Q = \dot{m}_{carc} C_{p_{carc}} (T_{sc} - T_{ec}) = \dot{m}_{tub} C_{p_{tub}} (T_{et} - T_{st}) \quad (1)$$

Donde “ $\dot{m}$ ” es representa el flujo másico, “ $C_p$ ” la capacidad calorífica y “ $T$ ” valores de temperatura respectivos a los subíndices “ $carc$ ” que indica la referencia al lado de la carcasa, “ $ec$ ” a la entrada del lado carcasa, “ $et$ ” a la entrada del lado tubos, “ $sc$ ” a la salida del lado carcasa y “ $st$ ” a la salida del lado tubos.

Debido a que los fluidos que se desplazan a lo largo del intercambiador de calor pierden o adquieren un índice de temperatura local diverso. Una forma de obtener un valor de temperatura representativo se logra mediante la implementación del concepto de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas.

La Ec. 2 representa una relación para un flujo de fluido en un sistema a contracorriente. Donde “ $T_h$ ” indica la temperatura más alta del fluido y “ $T_c$ ” la temperatura menor. Los índices 1 y 2 representan los datos con referencia al fluido de los lados carcasa y tubos, respectivamente (Kakac & Hongtan, 1998).

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left[ \frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right]} \quad (2)$$

Puesto que se requiere conocer el área total ( $A_{total}$ ) asociada a la transferencia de calor; se define la Ec. 3 para aproximar su magnitud como el producto del diámetro externo de los tubos ( $D_{e_{tub}}$ ), su longitud ( $L_{tub}$ ) y el número total de ellos ( $N_{tub}$ ) (Kakac & Hongtan, 1998):

$$A_{total} = \pi D_{e_{tub}} L_{tub} N_{tub} \quad (3)$$

Lo anterior permite analizar o predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, al cuantificar la energía transferida “ $Q$ ” estimando un coeficiente de transferencia de calor denominado global ( $U_{global}$ ), tal como lo expresa la Ec. 4 (Kakac & Hongtan, 1998).

$$Q = U_{global} A_{total} \Delta T_{ml} \quad (4)$$

El cálculo aproximado del coeficiente global de transferencia de calor se obtiene planteando la analogía con un circuito eléctrico en el cual se integran diversas resistencias. Los términos de resistencias asociados a la analogía se expresan como sumandos en el denominador de la Ec. 5. Datos de los coeficientes de transferencia de calor asociados al fluido circulando al interior de los tubos ( $h_i$ ) y en el exterior ( $h_o$ ), la conductividad en las paredes de los tubos ( $k_{mat}$ ), su diámetro interno ( $D_{i_{tub}}$ ) y externo ( $D_{e_{tub}}$ ), así como, el factor de ensuciamiento ( $R_{ic}$ ), intervienen en la relación.

$$U_{global} = \frac{1}{\frac{D_{e_{tub}}}{D_{i_{tub}} h_i} + \frac{R_{ic} D_{e_{tub}}}{D_{i_{tub}}} + \frac{D_{e_{tub}} \ln \left( \frac{D_{e_{tub}}}{D_{i_{tub}}} \right)}{2K_{mat}} + \frac{1}{h_o}} \quad (5)$$

El cálculo de las caídas de presión, a su vez, requiere de la definición del diámetro de la carcasa ( $D_s$ ). La Ec. 6 permite establecer una magnitud apropiada en función de las características dimensionales de los tubos:

$$D_s = 0.637 \sqrt{\frac{CL}{CTP}} \left[ \frac{A_{total} PR^2 D_{e_{tub}}}{L_{tub}} \right]^{0.5} \quad (6)$$

Donde el término CTP adquiere los valores 0.93, 0.90 y 0.85 en relación con si el número de pasos del fluido en el equipo se define como 1, 2 o 3, respectivamente. Por otra parte, el término CL adquiere el valor de 1.0 o 0.87 si, el arreglo de los tubos permite establecer una relación geométrica entre sus centros de, 90° y 45°, o de, 30° y 60°, respectivamente.

De esta forma, la caída de presión en el fluido del lado de los tubos se calcula con la siguiente ecuación (Kakac & Hongtan, 1998):

$$\Delta P_t = \left( \frac{4fL_{tub}Np}{Di_{tub}} + 4Np \right) \left( \frac{\rho v^2}{2} \right) \quad (7)$$

$$f = (0.79 \ln(Re_D) - 1.64)^{-2}$$

Donde “f” es el factor de fricción estimado a partir del número de Reynolds. Las variables “v” y “ρ” representan la velocidad y densidad del fluido, respectivamente. Tals que, la caída de presión en el fluido de lado de la carcasa es:

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2 (Nb+1) D_s}{2 \rho D_e \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}} \quad (8)$$

$$f = \exp(0.576 - 0.19 \ln(Re_s))$$

En resumen, los parámetros geométricos requeridos para especificación son:

- Diámetro interno de los tubos.
- Diámetro externo de los tubos.
- Número de baffles o mamparas.
- Número de tubos.
- Longitud de los tubos.
- Radio Pitch (CL).
- Número de pasos del fluido (CTP).

Por otra parte, se requiere especificar propiedades físicas de los materiales, incluidos los fluidos, tal como:

- Conductividad térmica del material de los tubos.
- Densidad, capacidad térmica y viscosidad de los fluidos.

Adicionalmente, se debe especificar los coeficientes de transferencia de calor. La definición de su magnitud no es arbitraria y por lo tanto, se debe establecer algún mecanismo para utilizar información confiable. El uso de correlaciones para estimar los coeficientes es una estrategia propuesta en este trabajo para concretar el diseño de un equipo intercambiador de calor tipo carcasa y tubos. Las referencias (Colburn, 1993), (Gnielinski, 1976), (Sieder & Tate, 1936), (Petukhov, 1970), (Sleicher & Rouse, 1975), así como, (Zukauskas & Ziugzda, 1985), (Kern, 1965), (Hilpert, 1933), (Bell, 1988), y (Taborek, 1991), se seleccionaron como fuentes confiables de datos de coeficientes de transferencia de calor para caracterizar los fluidos en circulación respecto al interior y el exterior de los tubos.

Correlación de Colburn (Colburn 1993)

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3}$$

Correlación de Gnielinski (Gnielinski 1976)

$$Nu_D = \frac{\left( \frac{f}{8} \right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{8} \right)^{0.5} (Pr^{0.66} - 1)}$$

Correlación de Sieder-Taste (Sieder 1936)

$$Nu_D = 0.027 Re_D^{0.8} Pr^{0.33} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Correlación de Petukov (Petukov 1970)

$$Nu_D = \frac{\left( \frac{f}{2} \right) Re_D Pr}{1.07 + 12.7 \left( \frac{f}{2} \right)^{0.5} (Pr^{0.66} - 1)}$$

Correlación de Nutter y Sleicher (Sleicher and Rouse 1975)

$$Nu_D = 5 + 0.015 Re_D^m Pr^n$$

$$m = 0.88 - \frac{0.24}{4 + Pr}$$

$$n = 0.33 + 0.5 \exp(-0.6 Pr)$$

**Tabla 1** Correlaciones para calcular números de Nusselt asociados al flujo de fluidos al interior de los tubos.

Fuente: elaboración propia [MS PowerPoint]

Las Tablas 1 y 2 muestran los datos tabulados de las correlaciones extraídas de las respectivas referencias para la determinación de números adimensionales de Nusselt, de cuya definición, se obtienen los valores de los coeficientes de transferencia de calor necesarios para la simulación; de acuerdo con las características de los procesos planteados en términos de los números adimensionales de Reynolds (Re) y Prandtl (Pr).

Correlación de Zukauskas (Zukauskas 1987)

$$Nu_D = C Re_{D,max}^m Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$$

	C	m
10 < Re ≤ 100	0.9	0.4
100 < Re ≤ 1000	0.683	0.466
1000 < Re ≤ 2E+05	0.35	0.6

Correlación de Kern (Kern 1950)

$$Nu_D = 0.36 Re_D^{0.55} Pr^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_b} \right)^{0.14}$$

Para números de Reynolds:

$$2 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^6$$

Correlación de Hilpert (Hilpert 1933)

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{0.33}$$

	C	m
0.4 < Re ≤ 4	0.989	0.330
4 < Re ≤ 40	0.911	0.385
40 < Re ≤ 4000	0.683	0.466
4000 < Re ≤ 4E+04	0.193	0.618
4E+04 < Re ≤ 4E+05	0.027	0.805

Correlación de Bell-Delaware (Delaware 1988)

$$h_o = J_i C_p \left( \frac{\dot{m}}{A_s} \right) \left( \frac{k}{C_p \mu} \right)^{0.66} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

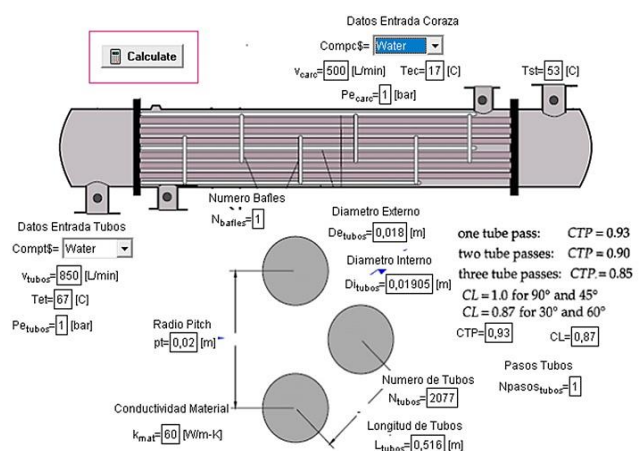
$$J_i = 0.37 Re_s^{-0.395}$$

Correlación de Taborek (Taborek 1991)

$$Nu_D = 0.2 Re_s^{0.6} Pr_s^{0.4}$$

**Tabla 2** Correlaciones para calcular números de Nusselt asociados al flujo de fluidos en el exterior de los tubos  
Fuente: elaboración propia [MS PowerPoint]

La Fig. 3 presenta la interfaz de usuario simplificada y amigable creada para los ejercicios de cálculo que establecen condiciones de diseño de los equipos. Datos relacionados con el flujo volumétrico y la temperatura de entrada de ambos fluidos, así como la presión de alimentación, se definen como condiciones de operación mediante casillas de texto con una etiqueta identificadora.

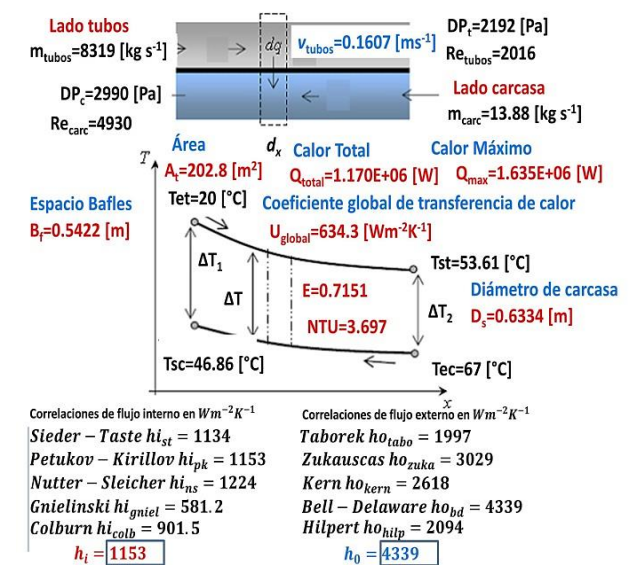


**Figura 3** Interfaz de usuario creada en el programa ESS para definir datos respecto al diseño de equipos  
Fuente: elaboración propia [Impresión de pantalla interfaz del programa ESS]

Adicionalmente, la codificación implementa el uso de los métodos del Número de Unidades de Transferencia (NTU de sus siglas en inglés) y el de Número de Eficiencia (ε), ambos números adimensionales dependientes de la capacidad térmica de los fluidos, que permiten obtener una estimación de la temperatura de salida de los fluidos (Reyes-Rodríguez et al., 2013). Para verificar y validar el alcance de los cálculos de la aplicación, se recurrió a información publicada sobre casos teóricos y experimentales, respectivamente.

**Resultados**

Se presentan los datos obtenidos de 5 casos de estudio y se analizan con respecto a la predicción del rendimiento térmico e hidráulico de equipos. La Fig. 4 muestra la interfaz de resultados conteniendo datos de una simulación.



**Figura 4** Interfaz de resultados de la simulación presentada al usuario  
Fuente: elaboración propia [Impresión de pantalla interfaz del programa ESS]

Como puede notarse, se obtienen resultados de flujos máxicos, diámetro de la carcasa, distancia entre baffles, caídas de presión, números de Reynolds, el coeficiente global de transferencia de calor, la temperatura de salida de fluidos, la transferencia de calor total y el área de transferencia de calor. Asimismo, explícitamente se definen coeficientes de transferencia de calor de 5 correlaciones para flujo interno y flujo externo, respectivamente. Dependiendo del tipo de proceso (Re, Pr), se realizan una serie de combinaciones de las correlaciones para obtener el coeficiente global de transferencia y posteriormente de la temperatura de salida de los fluidos con el método ε-NTU.

### Caso de análisis 1

La Tabla 3 contiene los datos geométricos y condiciones de operación de un equipo dispuesto como caso de estudio por (Flores-González, 2007). Utilizando la aplicación desarrollada se ejecutaron cuatro simulaciones tomando la información de las condiciones dispuestas al equipo y se cotejaron los resultados obtenidos, en particular, la temperatura de salida de los fluidos.

Datos		
Diámetro interno tubos	14.5 mm	
Diámetro externo de tubos	15.5 mm	
Número de tubos	55	
Longitud de tubos	1163.6 mm	
Paso de Pich	19.8mm	
Número de baffles	12	
Pasos en carcasa	1	
Pasos en tubos	1	
Conductividad del material de tubos	55 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
Arreglo de tubos	Triangular	
Caso 1		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	14700	14700
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	4	4
Temperatura (°C)	26.6	56.7
Caso 2		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	13800	14700
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	3.8	4
Temperatura (°C)	29.8	57.3
Caso 3		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	12900	14700
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	3.57	4
Temperatura (°C)	26.7	57
Caso 4		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	12000	14700
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	3.32	4
Temperatura (°C)	26.2	56.9

**Tabla 3** Datos geométricos y condiciones de proceso de los casos de estudio en el intercambiador de calor utilizado por (Flores-González, 2007)

Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

La Tabla 4 contiene la tabulación de la información de ambas fuentes, referencia - modelo propuesto, para los cuatro subcasos analizados considerando un equipo con una carcasa de 0.185 m y 0.1586 m de diámetro y, para un ajuste de la distancia entre baffles de 0.08325 m y 0.08951 m, respectivamente. Puede notarse que la temperatura de salida de los fluidos que circulan en el lado carcasa y en el interior de los tubos, difieren en el cálculo con el programa desarrollado entre 1 y 2 °C aproximadamente.

Los coeficientes de transferencia de calor denominados interno y externo que se adoptaron para las simulaciones fueron los respectivos a Nutter\_Sleicher y Zukauskas.

Dato	Subcaso	Referencia [40]	Modelo propuesto
Temperatura de salida de coraza. °C	1	35.3	33.64
	2	37.5	36.59
	3	35.6	34.56
	4	35.6	34.61
Temperatura de salida de tubos. °C	1	47.9	49.58
	2	49.4	50.86
	3	48.2	50.02
	4	48.9	49.95
Transferencia de calor total. W	1	148313	119813
	2	122663	108351
	3	132652	117389
	4	130341	116913
Coeficiente de transferencia de calor global. W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	2224	1697
	2	2198	1693
	3	2267	1676
	4	1976	1661
Coeficiente de transferencia de calor interno. W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	2763	3667
	2	2788	3684
	3	2770	3676
	4	2777	3673
Coeficiente de transferencia de calor externo. W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	4766	9883
	2	4633	9628
	3	4427	9148
	4	4312	8743
Caída de presión en carcasa. Pa	1	78000	35036
	2	68000	31018
	3	58000	27646
	4	51000	24282
Caída de presión en tubos. Pa	1	7000	1332
	2	7000	1330
	3	7000	1331
	4	7000	1331

**Tabla 4** Datos de interés para el Caso de análisis 1 tabulados para el cotejo de magnitudes

Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

### Caso de análisis 2

La Tabla 5 muestra las condiciones de operación y los parámetros geométricos considerados por Yusuf y Ozbilen (2004), así como, la tabulación de resultados de que permiten encontrar magnitudes similares en la temperatura de salida de fluidos, el diámetro de la carcasa, la distancia entre baffles, el área de transferencia, el coeficiente global y la transferencia de calor total. En la simulación los coeficientes respectivos de transferencia de calor interno y externo fueron los reportados por Nutter\_Sleicher y Bell\_Delaware.

Datos		
Diámetro interno de tubos	18 mm	
Diámetro externo de tubos	19.05 mm	
Número de tubos	2077	
Longitud de tubos	516 mm	
Paso de Pitch	0.02 mm	
Número de baffles	1	
Pasos en carcasa	1	
Pasos en tubos	1	
Conductividad del material de tubos	60 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
Arreglo de tubos	Triangular	
Caso 1		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	500	850
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	8.33	13.88
Temperatura (°C)	17	67
Dato	Referencia [7]	Modelo propuesto
Temperatura de salida de coraza, °C	40	39.28
Temperatura de salida de tubos, °C	53	53.64
Diámetro de coraza	1.219	1.034
Distancia entre baffles, m	0.258	0.258
Área de transferencia, m <sup>2</sup>	64.15	64.14
Transferencia de calor total, W	801368	775596
Coefficiente de transferencia de calor global, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	422	404.1
Coefficiente de transferencia de calor interno, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	490.4
Coefficiente de transferencia de calor externo, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	4431
Caída de presión en carcasa, Pa	100	2123
Caída de presión en tubos, Pa	78	3.6

**Tabla 5** Condiciones de operación, datos geométricos y comparación de resultados del Caso de análisis 2  
Fuente: Elaboración propia [Ms PowerPoint]

### Caso de análisis 3

De forma similar, la Tabla 6 contiene los datos de las condiciones de operación y los parámetros geométricos obtenidos del trabajo de Costa y Queiroz, (2008). Introduciendo los parámetros geométricos y las condiciones de operación para la simulación, nuevamente se realizó el proceso de comparación de resultados.

Datos		
Diámetro interno de tubos	30 mm	
Diámetro externo de tubos	31.75 mm	
Número de tubos	87	
Longitud de tubos	3048 mm	
Paso de Pitch	43 mm	
Número de baffles	6	
Pasos en carcasa	1	
Pasos en tubos	4	
Conductividad del material de tubos	60 Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
Arreglo de tubos	Triangular	
Caso 1		
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos
Flujo volumínico, L h <sup>-1</sup>	500	850
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	8.33	13.88
Temperatura (°C)	17	67
Dato	Referencia [7]	Modelo propuesto
Temperatura de salida de coraza, °C	40	41.56
Temperatura de salida de tubos, °C	53	52.27
Diámetro de coraza, m	0.438	0.4479
Distancia entre baffles, m	0.25	0.43
Área de transferencia, m <sup>2</sup>	24.63	25.84
Transferencia de calor total, W	813021	855154
Coefficiente de transferencia de calor global, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1012	1184
Coefficiente de transferencia de calor interno, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	6303
Coefficiente de transferencia de calor externo, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	2098
Caída de presión en carcasa, Pa	12000	20922
Caída de presión en tubos, Pa	12000	339.4
Velocidad en tubos, m s <sup>-1</sup>	0.64	0.94

**Tabla 6** Condiciones de operación, parámetros geométricos y comparación de resultados para el Caso de análisis 3  
Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

Las temperaturas de salida del lado coraza y tubos tienen un grado de similitud significativo si se utiliza una combinación de los coeficientes de transferencia de calor, interno y externo, correspondientes a las fuentes Nutter\_Sleicher y Bell\_Delaware, respectivamente.

### Caso de análisis 4

La Tabla 7 muestra información de 3 subcasos de estudio abordados por Leong (1998), cada uno considerando condiciones de operación y datos geométricos de equipo.

Subcasos 1, 2, 3			
Estructura	Lado de coraza	de	Lado de tubos
Fluido	Aire		Agua
Flujo volumínico, Lh <sup>-1</sup>	11000		610
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	1.689		10
Temperatura (°C)	100		30
Presión, bar	10		1
Datos	Subcaso 1	Subcaso 2	Subcaso 3
Diámetro de tubo externo, mm	25	25	31.7
Diámetro de tubo interno, mm	25.4	25.4	31.75
Número de tubos	439	497	316
Longitud de tubo, mm	2095	1995.8	2578.1
Paso de Pitch, mm	31.75	31.75	39.69
Número de baffles	3	3	4
Pasos en carcasa	1	1	1
Pasos en tubos	2	2	2
Conductividad del material de tubo, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	60	60	60
Arreglo de tubos	Cuadrangular	Cuadrangular	Cuadrangular

**Tabla 7** Condiciones de operación y datos geométricos del Caso de análisis 4

Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

En la Tabla 8 puede notarse que en la referencia (Leong, 1998) no presenta datos considerados para la validación. Sin embargo, la temperatura de los fluidos simulada se ajusta relativamente bien, (3 a 4 °C) cuando se consideran las correlaciones de Gnielinski y Taborék.

### Caso de análisis 5

Finalmente, la Tabla 9 contiene las condiciones de operación y los datos geométricos de los equipos analizado por El-Fawal, Fahmy, & Taher (2011) y Mizutani et al. (2003). Realizando la comparación del valor de la temperatura de salida de ambos fluidos se observa que la diferencia entre el modelo y las referencias es de alrededor de 5 °C aproximadamente. Para la simulación se encontró que los datos de los coeficientes de transferencia y calor, interno y externo, a considerar debían ser los definidos por Nutter\_Sleicher y Bell\_Delaware, respectivamente.

### Conclusiones

El diseño de equipos intercambiadores de calor tipo carcasa y tubos representa una actividad ingenieril que evolutivamente ha adquirido un nivel de sofisticación elevado.

Dato	Subcasos	Referencia [8]	Modelo propuesto
Temperatura de salida de coraza, °C	1	40	37.91
	2		37.5
	3		37.66
Temperatura de salida de tubos, °C	1	36.1	32.54
	2		32.56
	3		32.58
Diámetro de coraza, m	1	0.838	0.783
	2	0.889	0.833
	3	0.838	0.83
Distancia entre baffles, m	1	0.3352	0.52
	2	0.311	0.483
	3	0.311	0.51
Área de transferencia, m <sup>2</sup>	1	-	73.4
	2	-	77.56
	3	-	81.26
Transferencia de calor total, W	1	-	107516
	2	-	108493
	3	-	109341
Coeficiente de transferencia de calor global, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	-	55.2
	2	-	54.25
	3	-	51.4
Coeficiente de transferencia de calor interno, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	-	482.6
	2	-	408.8
	3	-	426.8
Coeficiente de transferencia de calor externo, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	1	-	63.16
	2	-	63.42
	3	-	59.06
Caída de presión en carcasa, Pa	1	4430	6424
	2	4615	6919
	3	4101	6815
Caída de presión en tubos, Pa	1	-	171.7
	2	-	131.2
	3	-	122.2
Velocidad en tubos, m s <sup>-1</sup>	1	-	0.094
	2	-	0.083
	3	-	0.081

**Tabla 8** Comparación de resultados de los planteamientos del Caso de análisis 4

Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

La innovación, sobre todo en la generación de aplicaciones computacionales, adopta las recomendaciones de las investigaciones tanto, para desarrollos teóricos como, de aplicaciones prácticas a nivel laboratorio o industrial. De esta forma, la contribución al desarrollo de estas herramientas, abordando diversos puntos de vista, representa el carácter evolutivo hacia el control deseado para la fabricación de equipos a bajo costo.

Caso 1			
Fluido: agua	Lado de coraza	Lado de tubos	
Flujo volumínico, Lh <sup>-1</sup>	850	500	
Flujo másico, kg s <sup>-1</sup>	13.88	8.33	
Temperatura (°C)	67	17	
Datos	Referencia [41]	Referencia [10]	Modelo propuesto
Diámetro interno de tubos, mm	12.6	22	12.6
Diámetro externo de tubos, mm	15.9	24	15.9
Número de tubos	832	700	832
Longitud de tubos, mm	4880	5000	4880
Paso de Pitch, mm	-	-	20
Número de baffles	8	8	8
Pasos en carcasa	-	-	1
Pasos en tubos	2	6	2
Conductividad del material de tubos Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	60	60	60
Arreglo de tubos	Triangular	Triangular	Triangular
Temperatura de salida de coraza, °C	55	55	45.55
Temperatura de salida de tubos, °C	37	37	52.78
Diámetro de coraza, m	0.687	1.11	0.633
Distancia entre baffles, m	0.54	0.52	0.54
Área de transferencia, m <sup>2</sup>	202	230	202.8
Transferencia de calor total, W	-	-	1246000
Coefficiente de transferencia de calor global, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	860	720	645.4
Coefficiente de transferencia de calor interno, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	-	1183
Coefficiente de transferencia de calor externo, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	-	-	4328
Caída de presión en carcasa, Pa	7494	4740	2998
Caída de presión en tubos, Pa	22676	11000	2251
Velocidad en tubos m s <sup>-1</sup>	-	-	0.16

**Tabla 9** Comparación de resultados de los planteamientos del Caso de análisis 5

Fuente: elaboración propia [Ms PowerPoint]

En particular, para la aplicación desarrollada en este trabajo, se demuestra que combinando la formulación matemática de la fenomenología implícita en sistemas de flujo a contracorriente y de una herramienta de alto potencial y de fácil accesibilidad como lo es el programa ESS, es posible obtener resultados con elevada rapidez y alta confiabilidad. Puesto que ha sido verificado y validado con información histórica reportada en la literatura en relación a la predicción del rendimiento térmico y mecánico del equipo.

Asimismo, la aplicación provee la información que determina las opciones de diseño y puede utilizarse para ajustar la construcción de equipos a condiciones de operación requeridas, con el análisis de sus posibles variaciones. Lo anterior en principio, para algunas sustancias que son comunes en procesos químicos y que requieren de su procesamiento a ciertas temperaturas específicas.

El uso de correlaciones proporciona una consistencia en la certidumbre para la asignación de coeficientes de transferencia de calor, interno y externo. Para las simulaciones se puede establecer cualquier combinación de éstas que pueda asociarse a un proceso con diferentes condiciones de operación.

## Referencias

- Babua, B. V., & Munawar, S. A. (2007). Differential evolution strategies for optimal design of shell-and-tube heat exchangers. *Chemical Engineering Science*, 3720-3739.
- Bell, K. J. (1988). Heat Transfer Equipment Design. En R. K. Shah, E. Subbarao, & R. Mashelkar (Ed.), *Delaware Method for Shell-Side Design* (págs. 145-166). New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2008). Heat exchanger design based on economic optimisation. *Applied Thermal Engineering*, 1151-1159.
- Cartaxo, S. J., & Fernandes, F. A. (2010). Educational software for heat exchanger equipment. *Computer Applications in Engineering Education*, 193-199.



- Colburn, A. P. (1993). A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, 174-210.
- Costa, A. L., & Queiroz, E. M. (2008). Design optimization of shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 1798-1805.
- El-Fawal, M. M., Fahmy, A. A., & Taher, B. M. (2011). Modelling of Economical Design of Shell and Tube Type Heat Exchanger Using Specified Pressure Drop. *Journal of American Science*, 32-40.
- El-Harbawi, M., Acellam, D., & Yin, C. (2011). Development of Educational Software for Designing Shell-and-Tube Heat Exchangers. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 291-296.
- Fesangharya, M., Damangira, E., & Soleimani, I. (2009). Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity. *Applied Thermal Engineering*, 1026-1031.
- Fettaka, S., Thibault, J., & Gupta, Y. (2013). Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 343-354.
- Flores-González, R. (2007). Tesis de Maestría. *Fabricación y Validación Experimental de un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza*. Ciudad de México, Distrito Federal, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Gawande, S. H., Wankhede, S. D., Yerrawar, R. N., Sonawane, V. J., & Ubarhande, U. B. (2012). Design and Development of Shell and Tube Heat Exchanger for Beverage. *Modern Mechanical Engineering*, 131-125.
- Geankoplis, C. J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall International, Inc.
- Gnielinski, V. (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International Journal of Chemical Engineering*, 359-368.
- Hilbert, R., Janiga, G., Baron, R., & Thévenin, D. (2006). Multi-objective shape optimization of a heat exchanger using parallel genetic algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2567-2577.
- Hilpert, R. (1933). Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren im Luftstrom. *Forsch Ing-Wes*, 215-224.
- Kakac, S., & Hongtan, L. (1998). *Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design*. Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.
- Keene, L. W., Gibbons, D. B., Evans, D. J., & Davies, T. W. (1994). Computer Modeling Validation for Shell and Tube Heat Exchangers. *Heat Transfer 1994. Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference* (págs. 37-42). Brighton, UK: Chameleon Press Ltd.
- Kern, D. Q. (1965). *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- Leong, Y. C. (1998). Shell and Tube Heat Exchanger Design Software for Educational Applications. *International Journal of Engineering Education*, 217-224.
- Machuca, F., & Urresta, O. (2008). Software para la enseñanza de la dinámica y control de intercambiadores de calor de tubos y coraza. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 52-60.
- Mehra, D. K. (1983). Shell and Tube Heat Exchangers. *Chemical Engineering*, 46-56.
- Mizutani, F. T., Pessoa, F. L., Queiroz, E. M., Hauan, S., & Grossmann, I. E. (2003). Mathematical Programming Model for Heat-Exchanger Network Synthesis Including Detailed Heat-Exchanger Designs. 1. Shell-and-Tube Heat-Exchanger Design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 4009-4018.
- Ozisik, M. (1990). *Transferencia de calor – Un texto básico*. Río de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.
- Patel, V. K., & Rao, R. (2010). Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique. *Applied Thermal Engineering*, 1417-1425.

- Petukhov, B. (1970). Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. *Advances in Heat Transfer*, 503-564.
- Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2009). Use of genetic algorithms for the optimal design of shell-and-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 203-209.
- Rajasekaran, S., & Kannadasan, T. (2010). Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers Using modified Genetic Algorithm. *International Journal of Control and Automation*, 1-10.
- Reppicha, M., & Zagermann, S. (1995). A new design method for segmentally baffled heat exchangers. *Computers & Chemical Engineering*, 137-142.
- Reyes-Rodríguez, M. B., Moya-Rodríguez, J. L., Cruz-Fonticiella, O., & Mestizo-Cerón, R. (2013). Diseño de Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza mediante el Método de Eficiencia-Número de Unidades de Transferencia y Optimización de los Costos usando MATLAB. *Revista Centro Azúcar*, 72-80.
- Sanaye, S., & Hajabdollahi, H. (2010). Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 1937-1945.
- Selbaşa, R., Kızılkana, Ö., & Reppich, M. (2006). A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 268-275.
- Sieder, E. N., & Tate, G. E. (1936). Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, 1429-1435.
- Sleicher, C., & Rouse, M. (1975). A convenient correlation for heat transfer to constant and variable property fluids in turbulent pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 677-683.
- Su, T. M., Khin, A. L., & Mi, S. M. (2008). Heat Exchanger Design. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 1151-1158.
- Taborek, J. (1991). Boilers, Evaporators and Condensers. En S. Kakac (Ed.), *Industrial Heat Exchanger Design Practices* (págs. 143-176). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tan, F. L., & Fok, S. C. (2006). An educational computer-aided tool for heat exchanger design. *Computer Applications in Engineering Education*, 77-89.
- TEMA. (2007). *Standard of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (Novena ed.). New York: Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.
- Toledo-Velázquez, M., Quinto-Diez, P., Alzelmetti-Zaragoza, J. C., Galvan, S. R., Abugaber-Francis, J., & Reyes-León, A. (2014). Delaware Method Improvement for the Shell and Tubes Heat Exchanger Design. *Engineering*, 193-201.
- Yusuf, A. K., & Ozbilen, G. (2004). A Computer Program for Designing of Shell-and-Tube Heat Exchangers. (Elsevier, Ed.) *Applied Thermal Engineering*, 1797-1805.
- Zukauskas, A., & Ziugzda, J. (1985). *Heat transfer of a cylinder in crossflow*. New York: Hemisphere Publishing.

## Adquisición de datos de enfriamiento con termopar tipo k para probetas de acero inoxidable en la plataforma Arduino

### Data acquisition of cooling using k-type thermocouple for stainless steel specimens on the Arduino platform

NÚÑEZ-ARIZA, Benjamín†, NÚÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemí, YÁÑEZ-VARGAS, Juan Israel y KANTUN-UICAB, María Cristina\*

*Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Maestría en Ingeniería, Fabricación y Materiales Avanzados.*

ID 1<sup>st</sup> Author: *Benjamín, Núñez-Ariza* / ORC ID: 0000-0002-6941-1903, CVU CONACYT ID: 1017742

ID 1<sup>st</sup> Coauthor: *Lourdes Nohemí, Núñez-Hernández* / ORC ID: 0000-0002-3684-7700

ID 2<sup>nd</sup> Coauthor: *Juan Israel, Yáñez-Vargas* / ORC ID: 0000-0001-5749-8442, CVU CONACYT ID: 295711

ID 3<sup>rd</sup> Coauthor: *María Cristina, Kantun-Uicab* / ORC ID: 0000-0003-1588-5414, CVU CONACYT ID: 162342

DOI: 10.35429/JEA.2020.23.7.19.23

Recibido: 10 de Abril, 2020; Aceptado: 30 de Junio, 2020

#### Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental en la adquisición de datos, de las temperaturas dentro de un horno marca Nobertherm P300 de resistencias, utilizando un termopar flexible Tipo-K usando la plataforma Arduino, y el procesamiento de datos es el software Matlab. Se utilizaron probetas de acero inoxidable (1/2" de diámetro por 2" de largo) como material de prueba. Los termopares fueron instalados dentro de las probetas a una profundidad de 1", después se colocaron dentro de un horno precalentado a la temperatura de 900 °C. El proceso de enfriamiento se realizó en un recipiente con agua a temperatura ambiente por 20 segundos. Los datos de enfriamiento se monitorearon con el Arduino Mega 2560 a través de módulos de lectura de termopar MAX 6675. El resultado obtenido durante el periodo de enfriamiento estudiado, es de seis lecturas por segundo. Esto podría ser una precisión comparable con equipos comerciales. Además, el procesamiento de datos se hizo en la plataforma de Matlab® dentro de una aplicación, donde se mostrarán los gráficos de las distintas pruebas.

**Adquisición de Datos, Termopar tipo K, Arduino Mega 2560**

#### Abstract

In the present work, was made an experimental study in the acquisition of data of the temperature in a furnace brand Nobertherm P300 of resistance, using a thermocouple flexible K-Type using the platform, Arduino, and the processing of data is in the software matlab. It was used stainless steel cylindrical (1/2" diameter per 2" long) specimens as test material. The thermocouples were installed inside the probes in a depth of 1 inch, then were placed in the pre-heated furnace to 900 °C. The cooling process was carried out with water at room temperature for 20 seconds. Cooling data were monitored employing an Arduino Mega 2560 connected to thermocouple reading modules MAX 6675. The results obtained were six readings per second in the cooling period studied. This could be a comparable precision to commercial equipment. Also, the data processing was done on the Matlab® platform within an application, where the graphics generated from the different test will be shown.

**Acquisition of data, thermocouple K-Type and Arduino Mega 2560**

**Citación:** NÚÑEZ-ARIZA, Benjamín, NÚÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemí, YÁÑEZ-VARGAS, Juan Israel y KANTUN-UICAB, María Cristina. Adquisición de datos de enfriamiento con termopar tipo k para probetas de acero inoxidable en la plataforma Arduino. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2020. 7-23:19-23.

\* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: mkantun\_ptc@upjr.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El procesamiento de información en las industrias es pieza fundamental, debido a que por medio de estos datos las empresas toman decisiones cruciales. Por otro lado, el manejar y mostrar datos de máquinas a través de una interface gráfica, es una tarea difícil de acoplar a las tecnologías tradicionales, ya que se les deben hacer modificaciones considerables pero necesarias para las exigentes políticas actuales del mercado.

De la página oficial de NATIONAL INSTRUMENTS nos dice que:

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC (Figura 1) con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

©2020 National Instruments Corporation



**Figura 1** Estructura de un sistema de adquisición de datos  
Fuente: imagen obtenida de la página oficial de NATIONAL INSTRUMENTS

Por lo tanto, el propósito de los equipos de adquisición de datos es la reducción de rechazos, ya que la manufactura actual, exige que el total de un determinado lote de piezas o un proceso se analice al cien por ciento.

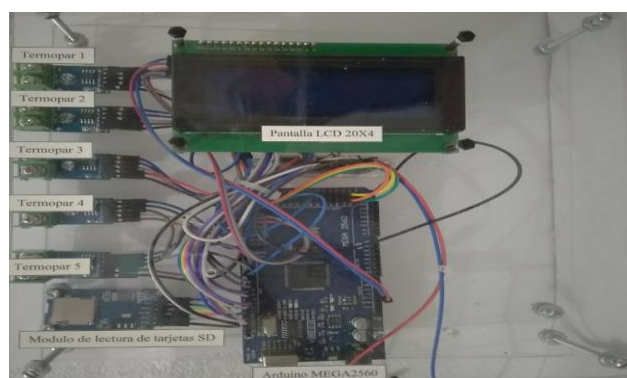
Del proceso de manufactura que actualmente nos exige que se obtenga el registro de cada variable presente y por medio de esta, se podrá determinar acciones sobre el material e incluso permitir garantizar que el proceso se cumplió dentro de los parámetros establecidos.

El surgimiento de las tecnologías y el diseño de nuevos sensores apoyan de manera conjunta para la obtención de estos datos. A través del presente documento se mostrará una alternativa acerca de estos dispositivos, en vista de que marcas distinguidas y comerciales no son tan accesibles para empresas en desarrollo.

## Metodología

El equipo se desarrolló en tres etapas: la primera consiste en la instalación de los equipos que servirán para la recolección de información, la segunda es la construcción del equipo y las probetas que van a ser sometidas al calor y por último la etapa de procesamiento de los datos que tendrá una interfaz gráfica en Matlab® en la aplicación guide.

El uso de la plataforma Arduino, tiene como objetivo mostrar la eficiencia en velocidad de recolección de datos a bajo costo, ya que esta plataforma es totalmente gratuita. Por lo tanto, la construcción del equipo se desarrolló sobre el modelo Mega 2560 de Arduino, la razón por la cual se elige esta placa es por contar con suficientes puertos digitales para el procesamiento de información que será recibida por los cinco módulos de comunicación Arduino con termopar el Max 6675 y posteriormente envidada al módulo de lectura de tarjetas SD dónde serán guardados los datos. Esta placa por ergonomía incluye los puertos designados para el lector de tarjetas SD, así como para la pantalla LCD. El objetivo de esta última nos permitió interactuar de forma visual con la plataforma y observar de manera instantánea si existe un problema con un módulo o termopar y actuar de inmediato y corregir cualquier anomalía. Por último, todo el equipo fue montado sobre dos hojas de acrílico de 6mm, con la finalidad de proteger el equipo de impacto y del polvo (Figura 2).



**Figura 2** Equipo totalmente instalado y etiquetado  
Fuente: imagen del Autor Ing. Benjamín Núñez Ariza

Por otro lado, se fabricaron las probetas de prueba para llevar a cabo el experimento, estas probetas están bajo la norma de templabilidad aceros ASTM 205-02 la cual nos indica que dimensiones son las correctas para efectuar dicho experimento (Figura 3).



**Figura 3** Probetas a utilizar durante los diversos experimentos en el cual es visible el barreno dónde fueron instalados los termopares

Fuente: imagen del Autor Ing. Benjamín Núñez Ariza

Para el caso particular de este trabajo, se utilizaron probetas de acero inoxidable con el objetivo de no generar residuo en cada prueba, pues de acuerdo con la siguiente definición se tomó esa decisión.

Los aceros inoxidables se seleccionan por su excelente resistencia a la corrosión. Todo verdadero acero inoxidable contiene un mínimo de aproximadamente 11% de Cr, lo que permite una superficie delgada y protectora capa de óxido de cromo para formar cuando el acero está expuesto al oxígeno. El cromo es lo que hace que los aceros inoxidables sean inoxidables.

(Askeland y Wright, 2016, p. 485).

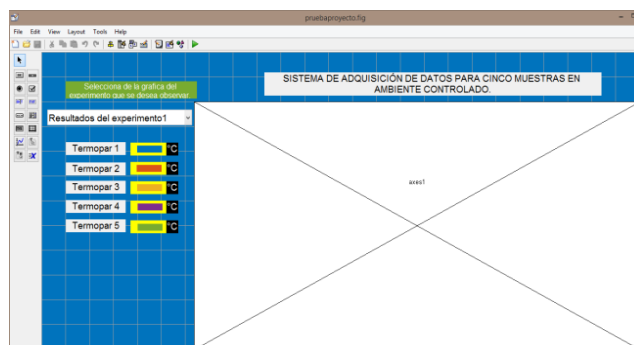
Ahora que se ha definido el motivo por el cual se empleó el acero inoxidable. Se continúa con la construcción de una estructura de material PTR en dónde se fijarán las probetas para ser introducidas en el horno y llevar a cabo los experimentos (Figura 4).



**Figura 4** Equipo dónde fueron instaladas las probetas

Fuente: imagen del Autor Ing. Benjamín Núñez Ariza

Para culminar esta etapa, se instaló un tanque de 60 litros con agua a una temperatura ambiente promedio de 22 °C, en dónde fueron enfriadas súbitamente las probetas. Por último, la etapa del procesamiento de los datos se hizo en una aplicación diseñada en Matlab®, (Figura 5), la única modificación que se le efectuó a los datos que se encontraban en la memoria SD, es en relación con una conversión de tipo de archivo .tex a uno .dat para que puedan ser reconocidos por Matlab®.



**Gráfico 1** Pantalla de desarrollo para la aplicación del procesamiento de los datos

Fuente: elaboración propia

## Resultados

Después de una serie de seis experimentos con un lapso promedio de una hora entre cada uno de ellos, se han recopilado los siguientes datos.

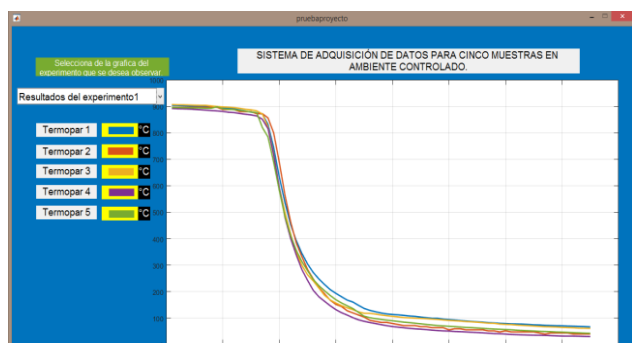
seg	T1	T2	T3	T4	T5
1	886	880.25	892.25	872.75	884.25
	882.25	880.5	888.75	870	882
	878	880.1	886.75	867.5	878.75
	874.5	872.25	882.75	863.5	876
	870.5	872	870.75	851	820
2	831.5	856	822.25	815.75	784.25
	744.5	735.5	722.25	716	688.5
	632.5	688	592.75	592.75	582
	536	564.25	499.5	479.75	483.25
	453.5	464	417.5	401	412
3	392.75	384.35	346.75	338.75	356.25
	344.5	332	299.25	283.25	313.5
	304.5	284.75	263.75	242.75	279.25
	272.5	248.75	240.75	205.25	246.25
	248	216	213.5	180.75	222.75
4	227	192	186.25	163.75	203.5
	208	168.25	169	147	185.75
	193.75	152	157.25	132.25	169.75
	181	144	147.25	120.75	157.5
	168.25	128.75	139	111.75	146.75
5	161	120	132.25	102	136.5
	148.5	112.5	123.75	93.75	122
	136.75	104	118.5	88.25	107.25
	129.5	92	118.25	83.5	101.75

**Tabla 1** Datos obtenidos del experimento uno

Fuente: elaboración propia [MatLab]

De acuerdo con la Tabla 1, en los primeros cuatro segundos se observa el enfriamiento súbito, donde se obtuvieron un total de 24 lecturas por cada termopar, en ese lapso se asume que paso de una temperatura de 880 °C a una temperatura de 100 °C en promedio, ya que ambas temperaturas son relativas de acuerdo a los factores de posición dentro del horno y al enfriamiento súbito con el agua.

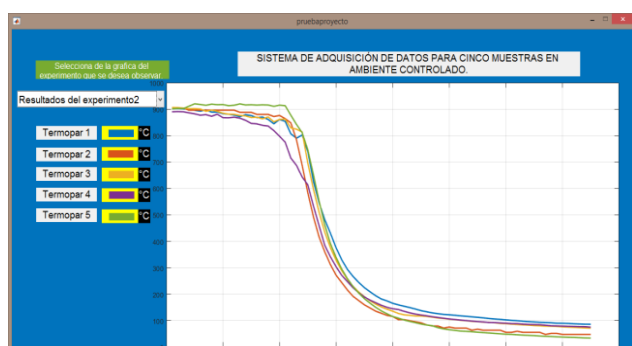
De los experimentos se puede percibir el cambio abrupto de las temperaturas de las probetas. Y una vez realizados una serie de experimentos, se determina que nuestro equipo, tiene la capacidad de recolectar información a una velocidad considerada con relación a los equipos comerciales. De tales experimentos se logró la obtención de seis lecturas por segundo como ya se expuso anteriormente. En el experimento 1 se obtuvo el Gráfico 2, en donde se puede observar que todas las probetas entraron al medio de enfriamiento equitativamente.



**Gráfico 2** Comportamiento gráfico de los datos obtenidos del primer experimento

Fuente: elaboración propia

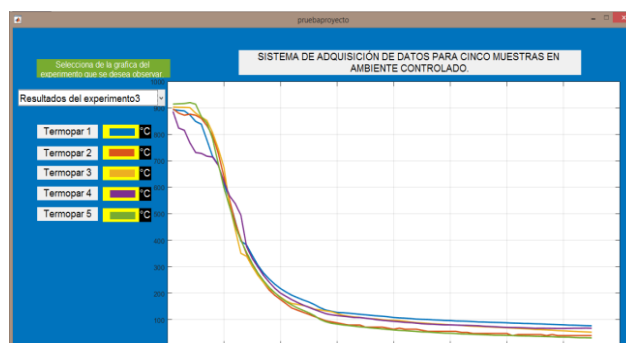
En el experimento dos, se observa en el Gráfico 3 donde, la probeta 4 entro primero al medio de enfriamiento, para posteriormente ingresar las demás probetas, por tal motivo el comportamiento de la gráfica es de la cual se siguen obteniendo las seis lecturas por segundo.



**Gráfico 3** Comportamiento gráfico de los datos obtenidos del segundo experimento

Fuente: elaboración propia

En general, se experimentó que el comportamiento del equipo de adquisición de datos posee en todas las pruebas la característica de la obtención de seis lecturas por segundo. Para el experimento tres se realizó un análisis gráfico, del punto en el cual se somete al enfriamiento súbito de las probetas y se percibe que nuevamente la probeta 4, es la que ingresa primero al medio de enfriamiento, seguido por las demás probetas Gráfico 4.

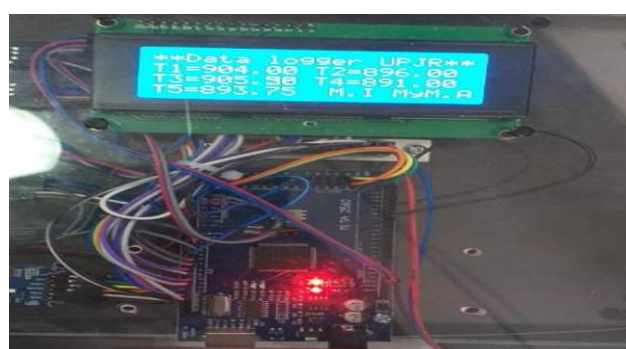


**Gráfico 4** Comportamiento gráfico de los datos obtenidos del tercer experimento

Fuente: elaboración propia

El motivo por el cual se obtienen resultados muy distintos es por la forma en la cual se realizaron los demás experimentos, esto se debe principalmente a que cada uno se realizó de forma manual, lo que complica replicar el experimento varias veces.

Otro de los resultados obtenidos es la interfaz visual que tiene el equipo con la pantalla LCD 20X4 (Figura 5), lo fundamental de este elemento es que durante las pruebas se logró tomar decisiones en cuanto a fallas de lectura presentadas, ya sea a causa de un falso contacto con los termopares o problemas de lectura con los módulos de lectura MAX 6675.



**Figura 5** Sistema de recolección de datos en funcionamiento con la pantalla LCD

Fuente: Imagen del Autor Ing. Benjamín Núñez Ariza

## Agradecimiento

Por brindarme la flexibilidad, el apoyo y las recomendaciones durante el desarrollo de este artículo, así como en el proceso de experimentación, al comité académico de la Maestría en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Juventino Rosas.

## Conclusión

El equipo cumple con las expectativas previstas, pues recolectó los datos esperados, se considera el mejoramiento del equipo, desde la parte del hardware hasta el software e incluso, el equipo de pruebas, el método de extracción del horno y el enfriamiento, debido a que este último proceso influye directamente en los resultados si se deseará hacer un estudio de tratamiento térmico.

Por tal razón, se le dará un seguimiento a este proyecto, con la finalidad de demostrar que este dispositivo es flexible, ergonómico y confiable, además que se puede adecuar a otros procesos industriales, por lo que se pretende adecuar para que pueda hacer lecturas de cualquier variable física de la que se busque generar datos. De igual manera la aplicación guide seguirá en desarrollo con el objetivo de mejorar la interacción con los gráficos.

## Referencias

ASTM Designation: 255-2 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel "THE SCIENCE AND ENGINEERING OF MATERIALS"

SEVENTH EDITION, DONAL. ASKELAND AND WENDELING J. WRIGHT ©2016,2011 Cengage Learning.

“LECTURAS DE INGENIERÍA...30 LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN UNAM” Recopilación de Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez:

## Sistema mecatrónico emulador de movimientos de la ATM

### Joint temporomandibular movement emulator mechatronic system

CORTÉS-RAMÍREZ, Ulises†\* & CASTAÑEDA-ESPINOZA, Angélica

*Universidad Tecnológica de Huejotzingo, Departamento de Mecatrónica. México.*

ID 1<sup>st</sup> Author: *Ulises, Cortés-Ramírez* / ORC ID: 0000-0003-4497-4774, CVU CONACYT ID: 425309

ID 1<sup>st</sup> Coauthor: *Angélica, Castañeda-Espinoza* / ORC ID: 0000-0002-9807-0378, CVU CONACYT ID: 727603

DOI: 10.35429/JEA.2020.23.7.24.33

Recibido: 01 de Mayo, 2020; Aceptado: 30 de Junio, 2020

#### Resumen

La Articulación Temporomandibular (ATM) del ser humano tiene tres funciones básicas: hablar, masticar y deglutir; y está formada por estructuras óseas, musculares y articulares, cuenta con tres grados de libertad, dos son angulares y uno lineal, durante el proceso de masticación entran en función los tres grados de libertad que la conforman, de lo que, uno de los problemas a resolver con este proyecto es crear un sistema mecatrónico que cuente con la capacidad de reproducir los movimientos de la ATM, esto para que estuantes de la carrera de Cirujano Dentista, dispongan de una herramienta didáctica de un modelo anatómico en el que puedan estudiar y observar sus movimientos, los movimientos se generarán a partir de mecanismos actuados con servomotores, esto impactará de manera directa las cátedras de Prostodoncia, Ortodoncia y Periodoncia. Por otra parte, el conocer a detalle la anatomía y fisiología de la ATM puede ayudar al estudio de tratamientos y prevención de enfermedades o disfunción de la misma.

**Articulación Temporomandibular, Emulador ATM, Movimiento Mandibular**

#### Abstract

The Temporomandibular Joint (TMJ) of the human being has three basic functions: speaking, chewing and swallowing; and it is formed by bone, muscle and joint structures, it has three degrees of freedom, two are angular and another one linear, during the chewing process the three degrees of freedom that make it up come into function, of which, one of the problems to solve with this project is to create a mechatronic system that has the ability to reproduce the movements of the TMJ, this so that students of the Dentist Surgeon's career, have a didactic tool of an anatomical model in which they can study and observe their movements, this movements will be generated from mechanisms operated with servomotors, this will directly impact the chairs of Prosthodontics, Orthodontics and Periodontics. On the other hand, knowing in detail the anatomy and physiology of TMJ can help the study of treatments and prevention of diseases or dysfunction of the same.

**Temporomandibular Joint, Emulator TMJ, Mandibular movement**

**Citación:** CORTÉS-RAMÍREZ, Ulises and CASTAÑEDA-ESPINOZA, Angélica. Sistema mecatrónico emulador de movimientos de la ATM. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2020. 7-23:24-33.

\* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: ulises.cortes@uth.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

La estructura curricular del antiguo plan de estudios, de la carrera de Cirujano Dentista impartida en la Facultad de Estudios Superiores Iztacala otorgaba a la oclusión un abordaje exiguo, durante el último año de estudios y dado que los avances científicos y tecnológicos, otorgan un cambio de perspectiva pasando de la odontología restauradora a un nuevo enfoque preventivo. Surge como una necesidad la reestructuración del nuevo plan de estudios, que otorgue las herramientas necesarias a los alumnos para enfrentarse a las situaciones que se presentaran a lo largo de su vida profesional (Universidad Nacional Autónoma de México).

Esto representa no solamente un cambio en los temas a impartir, también requiere de explorar metodologías del aprendizaje que aprovechen el alto grado de interacción de los estudiantes con la tecnología de uso común, tales como: teléfono, Tablet y múltiples dispositivos móviles; en respuesta a esto el presente trabajo, se enfoca en diseñar e implementar un modelo anatómico que pueda reproducir los movimientos de la Articulación Temporomandibular (ATM).

Con demasiada frecuencia, en las cátedras de Protopodancia, Ortodancia, Periodancia, entre otras, son enseñados conceptos diferentes y hasta contradictorios sobre oclusión. Estos conceptos estos conceptos son reforzados con equipo didáctico como tipodontos, representaciones anatómicas de la mandíbula, uno de los inconvenientes es que solo realizan movimientos de apertura y cierre, por lo que la alusión mecánica de la Articulación Temporomandibular no es certera, por lo que siguiendo la línea de investigación de Innovación Tecnológica de la Universidad Tecnológica de Huejotzingo, se desarrolló un modelo mecatrónico con la capacidad de emular los movimiento de la mandíbula. Ya que, de otra manera el estudiante se graduará con una impresión confusa e incompleta de los problemas de la oclusión, tal como sucede actualmente (Lugo, 2004).

Los movimientos articulares de la mandíbula incluyen cuatro factores fisiológicos básicos que son: oclusión dentaria, periodonto, ATM y mecanismo neuromuscular. La alteración de cualquiera de ellos afectara directamente a los demás; así mismo la alteración de estos elementos constitutivos alterara las funciones propias de este sistema tales como (Lugo, 2004):

- Masticación.
- Deglución.
- Respiración.
- Fonación.
- Postura.

Cabe mencionar que este sistema posee a la articulación más compleja del cuerpo humano: la Articulación Temporomandibular. En ella tienen lugar todos los movimientos de la masticación, y ella sufrirá considerables modificaciones según su modo de locomoción y el régimen alimenticio propio de cada ser humano. Durante la masticación la mandíbula realiza lo que llamamos un ciclo masticatorio, este consiste en un movimiento tridimensional resultante de la conjunción de movimientos de apertura, cierre, lateralidad, protrusión y retrusión por eso será preciso conocer cómo se realiza cada uno de estos movimientos y cuál es la actividad muscular necesaria para que tengan lugar (Lugo, 2004).

La implementación y diseño de herramientas didácticas de la articulación temporomandibular son muy variadas como por ejemplo se tiene el caso de (Herrera Forcelledo, Lazo Herrera, & León Medina, 2018), donde se implementó una aplicación multimedia, que consta de un módulo de contenido, el cual incluye los aspectos correspondientes a las características morfofuncionales de la ATM, donde se trabajan los contenidos desde el origen, y desarrollo de las estructuras que participan en su formación, así como alteraciones del desarrollo y clasificación.

Se tiene también el caso de (Machado, Castañeda, Pineros, & Suárez, 2006), donde se desarrolla un sistema robotizado para generar los movimientos de la ATM, con el fin de contar con una herramienta para prueba de resistencia de materiales de prótesis dentales, en este trabajo los autores consideran las fuerzas ejercidas por la mandíbula y los movimientos de apertura y cierre, lateralidad y protrusiva. Y plantean una apertura de 45mm, lateralidad de 5mm y protrusiva de 5mm, con fuerzas masticatorias promedio de 200 Newtons.

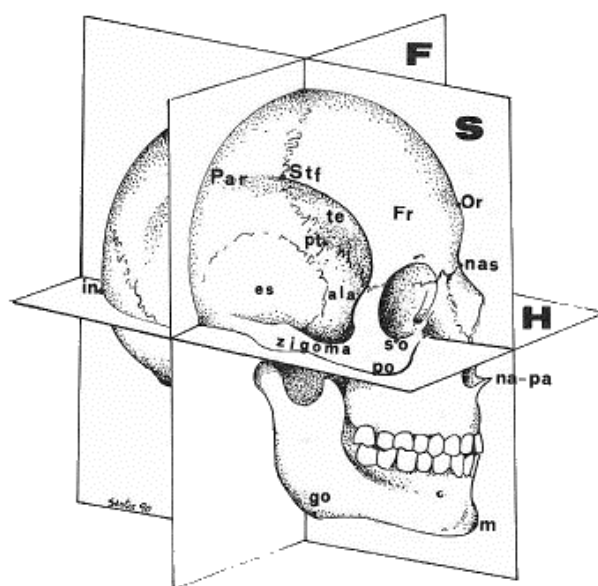
En este trabajo se pretende abordar la implementación de un sistema mecatrónico en el que sea posible replicar de forma animada los movimientos de la ATM, tendrá como impacto la facilitación del entendimiento y aprendizaje de los conceptos de Biomecánica, para la mayor comprensión del funcionamiento del sistema estomatognático, en el estudiante de la carrera Cirujano Dentista. Además, ofrecer una herramienta lúdica didáctica y alternativa para la enseñanza en el nuevo plan de estudios de la carrera Cirujano Dentista, con un beneficio tangible a los pacientes que se atienden en las clínicas odontológicas de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (FESI) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Como objetivo principal se pretende realizar un sistema físico que cuente con la capacidad de reproducir de manera animada los movimientos que realiza la articulación temporomandibular (ATM) del ser humano durante el proceso de masticación, esto con la finalidad de que pueda ser aprovechada como herramienta didáctica para las carreras de Cirujano Dentista de la Facultad de Estudios Superiores de Iztacala de la UNAM. En esta primera fase del trabajo se presenta los movimientos de lateralidad y protrusiva, que mecánicamente son representados con un movimiento lineal, así como también el movimiento de apertura y cierre.

### Anatomía de la Articulación Temporomandibular

Para una descripción de la morfología de la anatomía de cráneo humano se hace uso de un plano de referencia como se ilustra en la Figura 1, en la que se representa el cráneo seccionado por tres planos clave que son:

- Sagital (S).
- Frontal (F).
- y Horizontal (H).



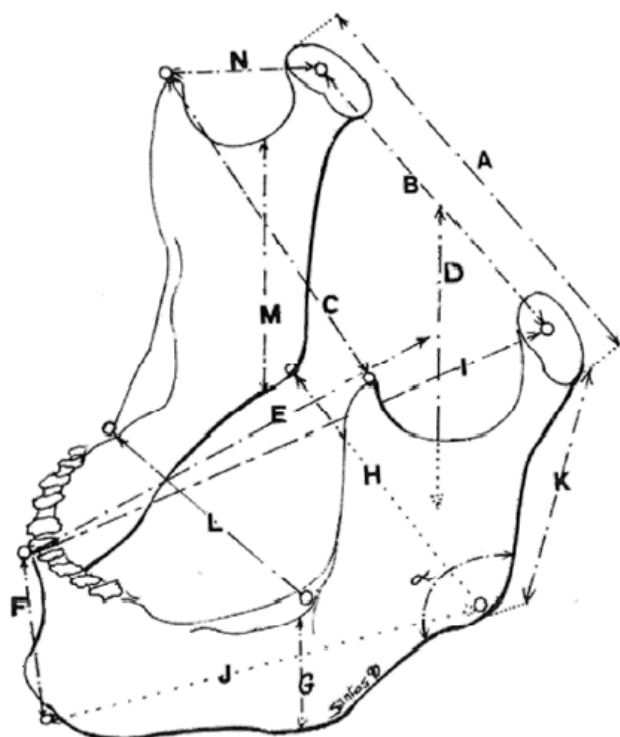
**Figura 1** Plano de referencia de la anatomía del cráneo  
Fuente: (Moreno Cabello, 2007)

El plano SAGITAL es el plano de simetría que divide al cuerpo en dos partes o mitades iguales, este también llamado plano medio, y es catalogado como MEDIAL.

El plano FRONTAL, que tiene unas amplias superficies aplanadas de delante a atrás, con un frente (hacia delante) y un dorso (hacia atrás), que contrasta con lo reducido de su perfil. El plano de la frente de la cara marca la frontalidad. Por tanto, todos los planos del sistema FRONTAL, son paralelos al plano de la frente.

El plano HORIZONTALES, transversales (perpendiculares) a los planos sagital y frontal. En la posición de sujeto de pie (con el eje corporal vertical), las secciones transversales al mismo son horizontales, el término transversal se refiere a un corte perpendicular al eje longitudinal de un elemento alargado (Moreno Cabello, 2007).

En (Moreno Cabello, 2007) se reportan siete medidas de la mandíbula En la Figura 1 se muestran las partes medidas y en la Tabla 1 sus valores en mm.



**Figura 2** Medidas de la mandíbula

Fuente: (Moreno Cabello, 2007)

Parámetros	1	2	3	4	5	6	7
A	113	103.7	116	111	104	105	110
B	96.5	85.3	98	93	86	89	97
C	85	85	95	93	90	83.5	86
D	50	55	52	43.5	49	42	46.5
E	86	84	84	83	84	91	88
F	30.5	30	27	28	26	34	28.5
G	23.5	23	23	18	21	24	22
H	84.7	84	100	93	91	87	81
I	100	98	106	97	96	106	105.7
J	77.5	79	84	75	75	82	84.5
K	59	55	54	53	58.5	54	53
L	56	53	55	ATR	57	53	61
M	46.7	40	45	51	41	37	33.4
N	30	35	33	28.4	30	37	33.4
$\alpha$	125	115	122	126	122	125	125

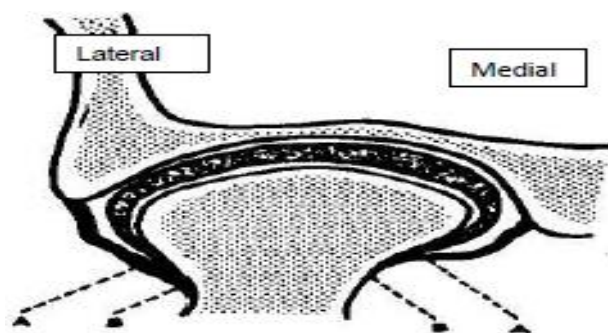
**Tabla 1** Distancias antropométricas mandibulares [mm]

Fuente: (Moreno Cabello, 2007)

### Disco Articular

El disco articular está formado por un tejido conjuntivo fibroso y denso desprovisto de vasos sanguíneos o fibras nerviosas. Morfológicamente se describe como un lente bicóncavo, con 2 caras, 2 bordes y 2 extremidades. Su periferia es de mayor grosor (borde posterior 3-4mm y borde anterior 1-2mm) y en el centro es más delgado (1mm).

La cara anterosuperior es cóncava en relación a la eminencia articular del temporal y convexa en la porción que queda en relación a la fosa mandibular, formando parte de la articulación temporomeniscal, mientras que la cara posteroinferior, es cóncava en toda su extensión y forma parte de la articulación maxilomeniscal como se muestra en la Figura 3 (García Garro, Meneses Beltran, & Vega Ávila, 2012).



**Figura 3** Ligamentos lateral y medial

Fuente: (García Garro, Meneses Beltran, & Vega Ávila, 2012)

### Movimientos de la Articulación Temporomandibular (ATM)

La articulación temporomandibular realiza las funciones de masticación y habla, estas funciones son generadas a partir de los movimientos de:

- **Apertura y Cierre:** En este movimiento mantiene una oclusión céntrica, por la contracción de los músculos infrahioideos. La articulación supra meniscal interviene en este movimiento que se realiza en dos tiempos: En el primer tiempo o pequeña apertura los cóndilos del maxilar inferior se encuentran paralelamente de acuerdo a su eje de rotación. El segundo tiempo o gran apertura se debe por la contracción simultánea de los pterigoideos externos, que hacen que los meniscos se deslicen por las vertientes posteriores de los cóndilos temporales (Velarde Huanca, 2012).

- **Movimiento de Propulsión:** En este movimiento el maxilar inferior debe dirigirse hacia adelante. Por el cual intervienen los músculos genihoideos que deben tener una actividad depresora, este movimiento debe ser regulado por los músculos elevadores para evitar que el maxilar inferior descienda demasiado. Concluido este movimiento los dientes inferiores se encuentran 5 milímetros por delante de los dientes superiores (Velarde Huanca, 2012).
- **Movimiento de Retropulsión:** El maxilar inferior debe volver a la posición de oclusión céntrica en la que estaba inicialmente. Los primeros en intervenir son los músculos depresores con ayuda de los digástricos, el trabajo en conjunto hace retornar a los cóndilos y a los meniscos a las cavidades glenoideas (Velarde Huanca, 2012).
- **Movimiento de lateralidad Centrifuga:** El maxilar inferior debe dirigirse hacia uno de los lados laterales para que el punto mentoniano se aleje del plano sagital. En este caso el maxilar inferior debe bajar un poco para que no exista engranamiento dentario, donde el cóndilo del lado opuesto al del movimiento es traccionado por el pterigoideo externo y recorre junto con el menisco el plano de trayectoria condílea, dirigiéndose abajo, adelante y adentro. En este movimiento se requiere, que músculos maseteros y pterigoideos internos mantengan el contacto dentario, donde el punto mentoniano recorre una distancia de 5 a 15 milímetros.
- **Movimiento de lateralidad centrípeta:** El cóndilo de maxilar inferior, lateralizado vuelve a la primera ubicación, de oclusión céntrica, por la contracción de las fibras horizontales del músculo temporal.

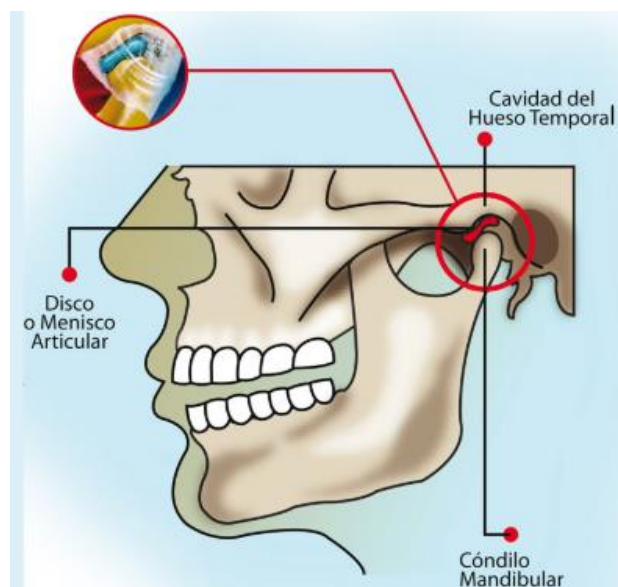
### Representación física de cóndilos y mandíbula

Basándose en la revisión de la literatura citada con anterioridad, podemos clasificar los movimientos de la mandíbula como:

- Apertura Cierre.
- Lateralidad.

- Propulsión.
- Y retropropulsión.

Para estos cuatro movimientos se tienen tres componentes principales ilustrados en la Figura 4, uno es el cóndilo mandibular, el disco articular que sirve como cojinete de deslizamiento y la cavidad del hueso temporal o cavidad glenoidea.



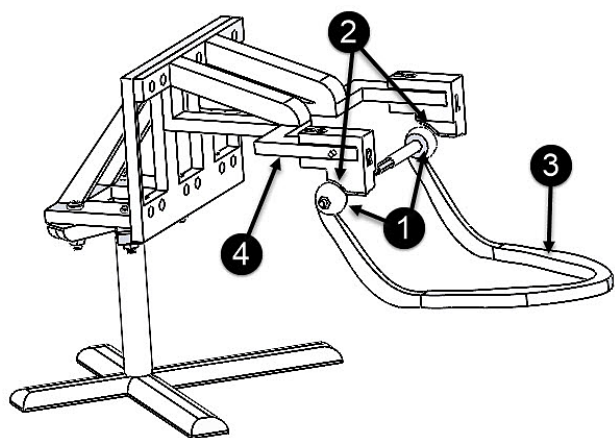
**Figura 4** Cavidad del Hueso Temporal, cóndilo mandibular y disco articular

Fuente: (clinicavass, s.f.)

Para realizar la emulación de los movimientos de la mandíbula se realizó un modelo, que representará los cóndilos, mandíbula y la cavidad glenoidea, como se muestra en la Figura 5, de la que sus elementos corresponden a:

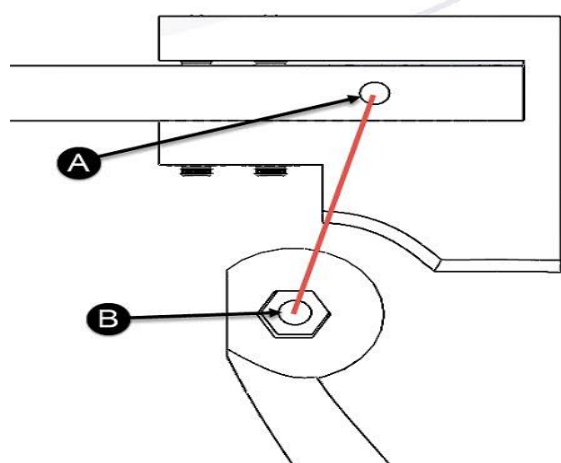
- Representación de Cóndilos.
- Representación de Cavidad Glenoidea.
- Representación de mandíbula.
- Soporte de Sistema Emulador.

Los cóndilos y la cavidad glenoidea estarán unidos a través de un amortiguador del punto A al punto B, como se muestra en la Figura 6, este amortiguador permitirá el deslizamiento a través de la superficie curva de la cavidad glenoidea.



**Figura 5** Representación física de Cóndilo y Cavidad Glenoidea

Fuente: elaboración propia [SolidWorks]



**Figura 6** Unión de cóndilo y cavidad glenoidea

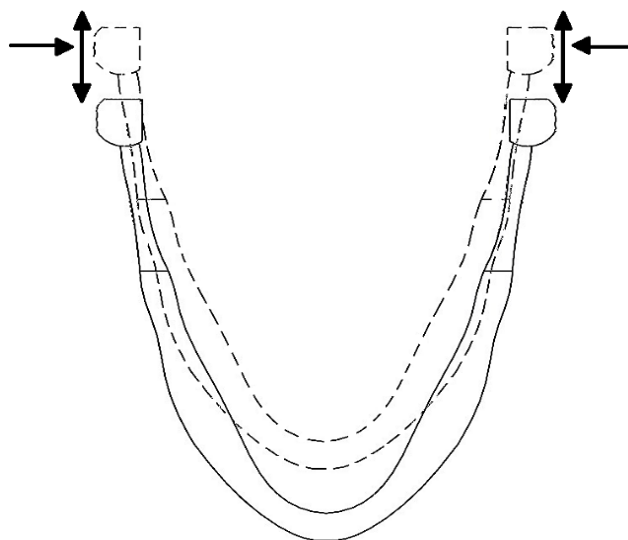
Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

### Implementación de Movimientos de Lateralidad, Propulsión y Retropropulsión

Mecánicamente se puede argumentar que el movimiento de apertura y cierre está definido como un movimiento angular, que como ya se mencionó con anterioridad consta de dos fases, donde la segunda fase de gran apertura está acompañada de un movimiento de Propulsión, es decir que además del movimiento angular también se tiene un movimiento hacia delante de la mandíbula

Para el caso del movimiento de propulsión y retropropulsión constan del desplazamiento hacia delante de los dos cóndilos mandibulares como se ejemplifica en la Figura 8 y el movimiento de retropropulsión está determinado como el movimiento hacia atrás de la mandíbula.

Considerando el plano sagital este movimiento de hacia adelante y posteriormente hacia atrás de la mandíbula se realiza en el eje X, este desplazamiento también deberá seguir la curvatura de la cavidad glenoidea por lo que también tendrá un movimiento en el eje Y.

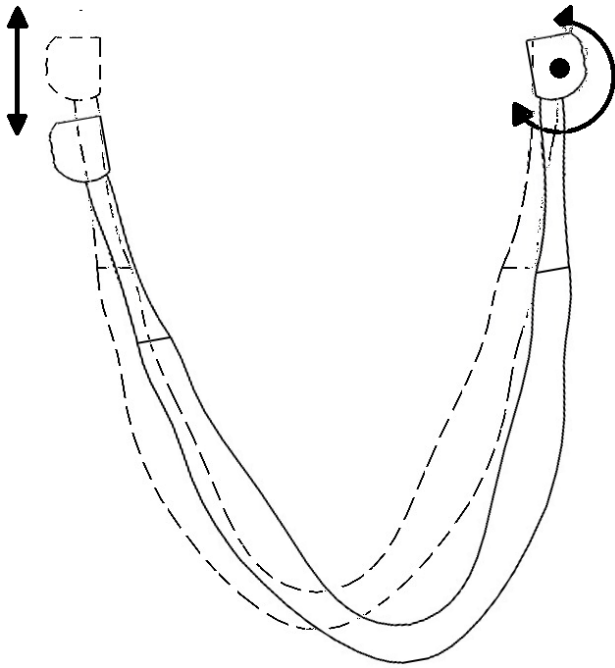


**Figura 7** Movimiento hacia adelante y atrás de los Cóndilos

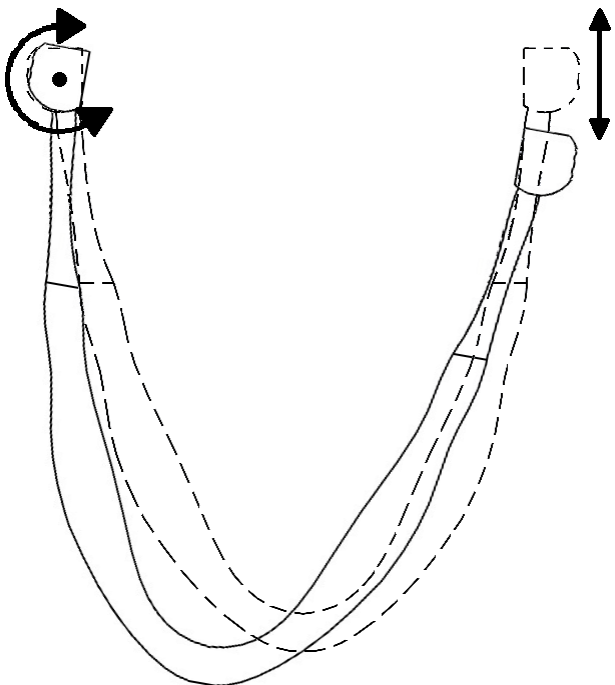
Fuente: elaboración propia [Paint]

Para el caso del movimiento de lateralidad solo es un cóndilo el que se desplaza hacia el frente, generando que el eje de giro este situado en el centro del cóndilo que permanecerá estático, como se observa en la Figura 8 y Figura 9.

Para recrear este movimiento en los ejes X y Y del plano sagital se diseñó una articulación lineal, implementada con un tornillo sin fin motorizado para generar el desplazamiento en el eje X, unido al cóndilo a través de un cardan para permitir el deslizamiento en el eje Y generado por la curvatura de la cavidad glenoidea, este mecanismo esta unido al eje que une a los dos cóndilos a través de una rotula.

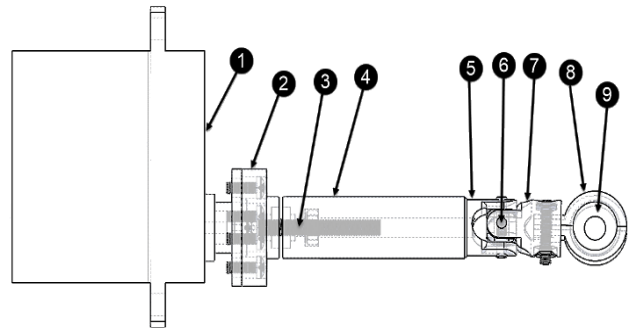


**Figura 8** Movimiento de lateralidad izquierda  
Fuente: elaboración propia [Paint]



**Figura 9** Movimiento de lateralidad derecha  
Fuente: elaboración propia [Paint]

En la Figura 10, se muestra el mecanismo de la articulación lineal implementada para mover los cóndilos de adelante hacia atrás. Esta articulación está conformada por un servomotor de rotación continua, un tornillo sin fin para generar un movimiento lineal en el eje X. del plano Sagital y un cardan para permitir el deslizamiento a través del eje Y por la curvatura de la cavidad glenoidea, la rótula permite una rotación en el eje Y cuando uno de los cóndilos se está desplazando hacia adelante o hacia atrás y el otro está estático.



**Figura 10** Mecanismo de articulación lineal  
Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

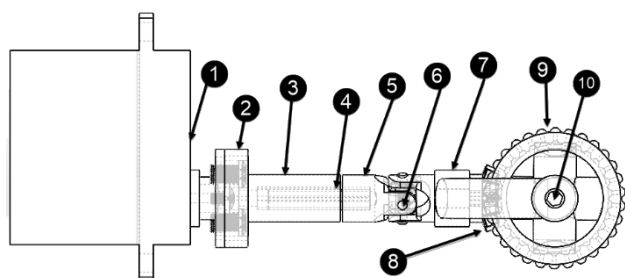
- Servomotor de rotación continua.
- Brida unión motor y tornillo sin fin.
- Tornillo sin fin.
- Cilindro de tornillo sin fin.
- Cardan unido a tornillo sin fin.
- Unión de cardan.
- Cardan unido a rotula.
- Base de rotula.
- Esfera de rotula unida al eje de cóndilos.

### Implementación de Movimientos de Apertura y Cierre

Para implementar el movimiento de apertura y cierre, se diseñó una articulación angular mostrada en la Figura 11.

- Servomotor.
- Brida unión motor con eje cilíndrico.
- Cilindro para acoplamiento con mecanismo angular.
- Eje de acoplamiento de motor con mecanismo angular.
- Cardan motor.
- Unión cardan.
- Cardan mecanismo angular.
- Piñón
- Cremallera.

– Eje unión cóndilos.



**Figura 11** Mecanismo de articulación angular  
Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

La articulación angular genera un giro en el eje Z del plano sagital, generando el movimiento de apertura y cierre, el centro de giro situado en el eje Z se desplazará a través del eje X y eje Y para generar el movimiento de máxima apertura.

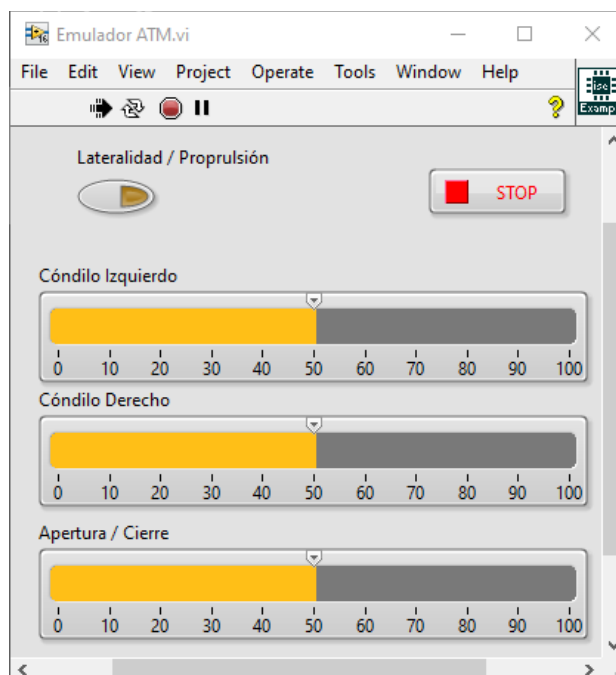
Este mecanismo angular además de generar el giro en el eje Z del plano sagital, también debe permitir que los cóndilos se desplacen de adelante y hacia atrás de manera simultánea o independientemente, para movimientos de propulsión y retropropulsión, o lateralidad.

El movimiento angular es generado por una caja de engranes de 90°, para permitir el desplazamiento en el eje X del plano sagital, se tiene un eje de acoplamiento que une el eje del motor con el eje del mecanismo angular, para el desplazamiento en el eje Y, generado por la curvatura de la cavidad glenoidea se cuenta con una unión cardan.

### Programa para generar los movimientos de las articulaciones lineales

Como ya se mencionó previamente las articulaciones lineales se actuaron con servomotores de rotación continua, en el caso del servomotor la referencia que se le indica es la velocidad angular en un rango porcentual de 0 a 100%, donde el 0% corresponde a la velocidad máxima en sentido antihorario, 50% a una velocidad cero y 100% a la velocidad máxima en sentido horario, esto es lo que permite que el cóndilo pueda moverse de adelante y hacia atrás.

Para manipular los servomotores de rotación continua se implementó una interfaz de usuario en el software LabVIEW mostrada en la Figura 12, y como hardware se empleó una tarjeta Nucloe-F3030K, compatible con el lenguaje de programación ISE-LabVIEW® (Cortés Ramírez & Castañeda Espinoza, 2018).



**Figura 12** Interfaz de usuario para la manipulación de las articulaciones de la ATM

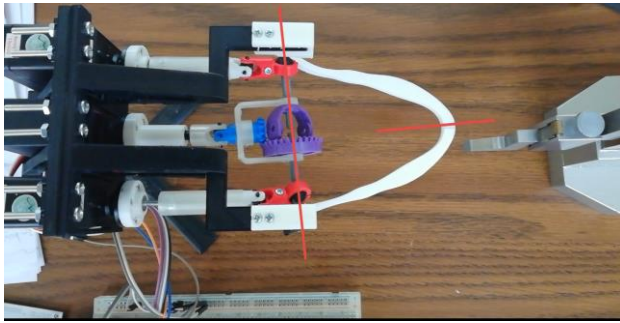
Fuente: elaboración propia [LabVIEW]

Este programa permite generar los movimientos de lateralidad, propulsión y retropropulsión, al igual que el movimiento de apertura y cierre.

### Resultados

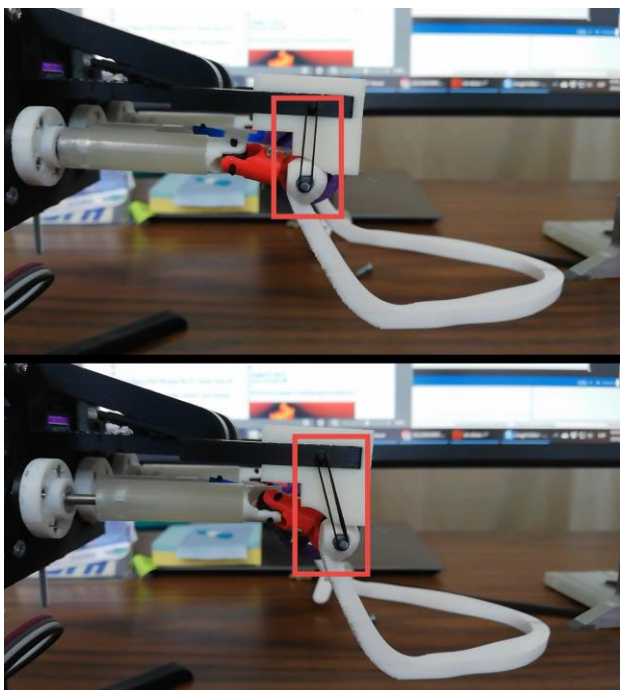
El sistema mecatrónico desarrollado consta de tres articulaciones, dos lineales y una angular, a partir de ellas se logró generar cuatro de los movimientos de la ATM, los cuales son:

- **Movimiento de lateralidad:** en la Figura 13, se muestra el movimiento de lateralidad a la izquierda, para este caso el cóndilo del lado izquierdo permanece en su lugar y su centro sobre el eje Y del plano sagital es el centro de giro de la mandíbula. para el caso de la articulación angular el cardan y el eje lineal permiten que permanezca unida la cadena cinemática, por lo que en esta posición sería posible un movimiento de apertura y cierre.



**Figura 13** Movimiento de lateralidad  
Fuente: fotografía (Trabajo de campo, 2020)

- **Movimiento de Propulsión y Retropropulsión:** en la Figura 14 se muestra el movimiento de propulsión del cóndilo derecho, el cual es desplazado hacia adelante por el tornillo sin fin de la articulación lineal, el cardan permite que pueda moverse a través del eje Y del plano sagital, para seguir la curvatura de la cavidad glenoidea.
- **Movimiento de apertura y cierre:** en la Figura 15, se muestra el movimiento de máxima apertura el cual está acompañado de un movimiento angular de la mandíbula y el desplazamiento hacia delante de los cóndilos.



**Figura 14** Movimiento de propulsión y retropropulsión  
Fuente: fotografía (Trabajo de campo, 2020)



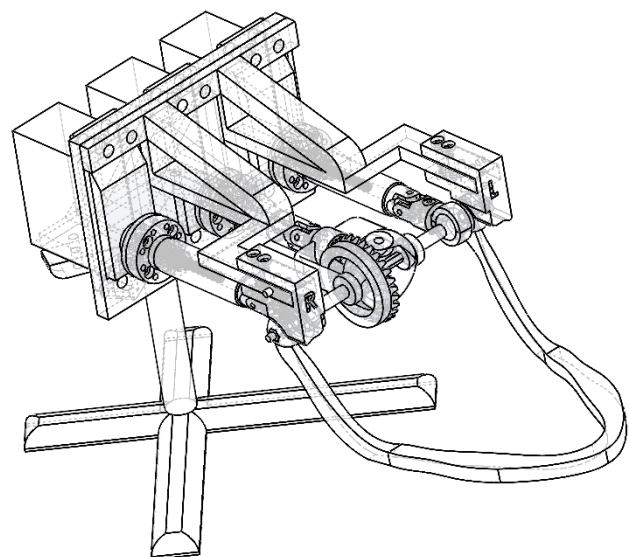
**Figura 15** Movimiento de máxima apertura  
Fuente: fotografía (Trabajo de campo, 2020)

## Conclusiones

En la Figura 16, se muestra el prototipo para imitar los movimientos de la mandíbula, para el caso de los cóndilos se diseñó una representación física con las que fuera posible visualizar los movimientos, físicamente estos elementos no tienen esta forma, pero si las dimensiones físicas, como el ancho y altura de la mandíbula.

El proyecto planteado pretende generar los movimientos que realiza la articulación temporomandibular para la función de masticación, para esto se requieren de cinco movimientos que son:

- Apertura y Cierre.
- Lateralidad.
- Propulsión.
- Y retropropulsión.



**Figura 16** Prototipo para emular los movimientos de la mandíbula  
Fuente: elaboración propia [SolidWorks]



Movimientos que el prototipo emulador de movimientos de la ATM ya tiene.

En esta fase del proyecto se tiene implementados los movimientos de lateralidad, propulsión y retropropulsión, así como el de apertura y cierre, generados a partir de dos articulaciones lineales, unidas a la mandíbula a través de un cardan y rotula, esta configuración mecánica posee el movimiento lineal de los cóndilo y además permite seguir la curvatura de la cavidad del hueso temporal, la rótula permite que cuando uno de los cóndilos se mueve linealmente el otro tenga un movimiento rotatorio sobre el eje perpendicular al plano horizontal; y la articulación angular que abrirá y cerrará la mandíbula con la capacidad mecánica de que su eje de rotación pueda girar en el eje Y del plano Sagital.

Con los movimientos que ya cuenta el prototipo, ya es posible desarrollar la secuencia de movimiento para simular el proceso de masticación de la ATM.

El prototipo a pesar de que cuenta con la capacidad de imitar los movimientos de la ATM aún puede perfeccionarse sus mecanismos para evitar vibración y tener una mejor resolución en los movimientos, desarrollar una mandíbula de tamaño real y los huesos temporales, así como las cavidades glenoideas.

El sistema mecatrónico emulador de la ATM, es un desarrollo tecnológico que va orientado a facilitar las prácticas de los cirujanos dentistas, dado que el mecanismo empleado permite realizar movimientos similares al de las personas, buscando que los estudiantes de esta carrera tengan herramientas cercanas a lo que pueden experimentar los pacientes. Además de ello, puede ser útil para dotar a androides de expresiones faciales a través de movimientos mandibulares, ya que actualmente solo simulan el habla con movimientos de apertura y cierre.

## Referencias

clinicavass. (s.f.). Tensión en la mandíbula: causas, efectos y ejercicios de relajación. Recuperado el 2019 de Septiembre de 20, de <https://clinicavass.com/tension-mandibula-causas-efectos-ejercicios-relajacion/>

Cortés Ramírez, U., & Castañeda Espinoza, A. (2018). Interfaz de Sistemas Embebidos con LabVIEW (ISE-LabVIEW©). Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, 303-308.

García Garro, P. A., Meneses Beltrán, Y. S., & Vega Ávila, G. C. (2012). Descripción Anatómica y Cinemática del Musculo Pterigoideo Lateral (MPTL). Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.

Herrera Forcelledo, A., Lazo Herrera, L. A., & León Medina, D. (2018). Herramientas informáticas educativas sobre las características morfofuncionales de la articulación temporomandibular. Universidad Medica Pinareña, 14(3), 248-256.

Lugo, A. A. (2004). Fundamentos de Oclusión. México: Instituto Politécnico Nacional.

Machado, C., Castañeda, J., Pineros, P., & Suárez, L. (2006). Desarrollo de un simulador de movimientos mandibulares para pruebas de resistencia abrasiva de biomateriales. Actas Odontológicas, 3(1), 55-59.

Moreno Cabello, P. (2007). Estudio de la Dinámica Mandibular Humana en un Articulador Dental Virtual Individualizable. Córdoba: Universidad de Córdoba.

Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). Plan de Estudios de la Carrera de Cirujano Dentista. Iztacala, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Velarde Huanca, A. R. (2012). Fisiología de la articulación Temporomandibular. Revista de Actualización Clínica, 23, 1075 - 1079:

**[Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]**

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Autor†\*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2<sup>do</sup> Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3<sup>er</sup> Coautor

*Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)*

*International Identification of Science - Technology and Innovation*

ID 1<sup>er</sup> Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2<sup>do</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2<sup>do</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

**Resumen (En Español, 150-200 palabras)**

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)**

**Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)**

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)**

---

**Citación:** Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

---

---

\* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

**Introducción**

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Artículo

**Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente**

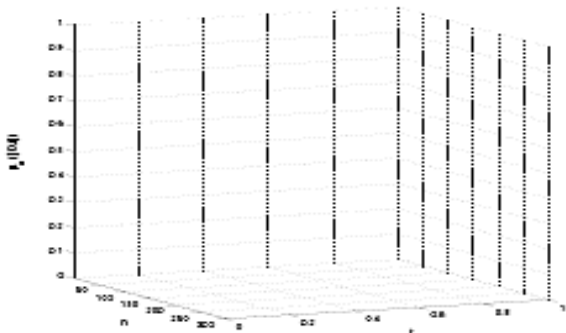
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

**Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables**

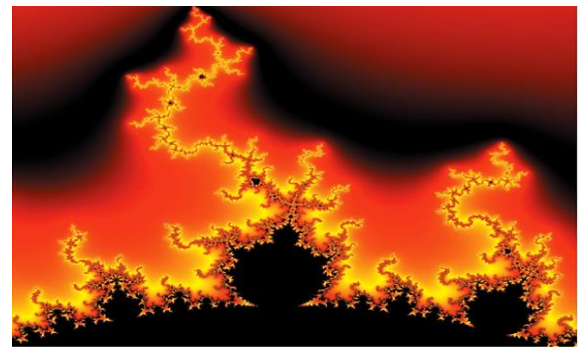
En el *contenido del Artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No. 10 y Negrita]



**Gráfico 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)  
 No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)  
 No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Cada Artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

**Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:**

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

**Metodología a desarrollar**

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

**Resultados**

Los resultados deberán ser por sección del Artículo.

**Anexos**

Tablas y fuentes adecuadas.

**Agradecimiento**

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

**Conclusiones**

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

**Referencias**

Utilizar sistema APA. No deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Artículo.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

**Ficha Técnica**

Cada Artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción.*
2. *Descripción del método.*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda.*
4. *Resultados.*
5. *Agradecimiento.*
6. *Conclusiones.*
7. *Referencias.*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

**Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:**

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

## **Reserva a la Política Editorial**

Revista de Aplicaciones de la Ingeniería se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

## **Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales**

### **Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución**

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista de Aplicaciones de la Ingeniería emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Bolivia considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

## Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-México, S.C en su Holding Bolivia para su Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

## Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

### Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

### Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

### Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

### **Responsabilidades de los Autores**

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

### **Servicios de Información**

#### **Indización - Bases y Repositorios**

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

DULCINEA (Revistas científicas españolas)

UNIVERSIA (Biblioteca Universitaria-Madrid)

SHERPA (Universidad de Nottingham- Inglaterra)

#### **Servicios Editoriales**

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Artículo con PLAGSCAN

Evaluación de Artículo

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Artículo

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Traducción

Publicación de Obra

Certificado de Obra

Facturación por Servicio de Edición

#### **Política Editorial y Administración**

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre – Bolivia. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: [contact@ecorfan.org](mailto:contact@ecorfan.org) [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**ECORFAN®**

**Editor en Jefe**

JALIRI-CASTELLON, María Carla Konradis. PhD

**Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

**Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

**Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

**Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

**Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

**Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

**Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

**Publicidad y Patrocinio**

(ECORFAN® Bolivia), [sponsorships@ecorfan.org](mailto:sponsorships@ecorfan.org)

**Licencias del Sitio**

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. [financingprograms@ecorfan.org](mailto:financingprograms@ecorfan.org)

**Oficinas de Gestión**

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre – Bolivia.



# Revista de Aplicaciones de la Ingeniería

Modelo del transformador monofásico en el dominio de la frecuencia

**ESCAMILLA-SÁNCHEZ, Juan Carlos, MORALES-AGUILAR, Eric, CANDIA-GARCÍA Filiberto, MAR, José Luis y MARTINEZ, Daniel F.**

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

*Universidad de Colima*

Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos

**NUÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemi, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, KANTUN-UICAB, María Cristina y TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio**

*Universidad Politécnica de Juventino Rosas*

Adquisición de datos de enfriamiento con termopar tipo k para probetas de acero inoxidable en la plataforma Arduino

**NÚÑEZ-ARIZA, Benjamín, NÚÑEZ-HERNÁNDEZ, Lourdes Nohemí, YÁÑEZ-VARGAS, Juan Israel y KANTUN-UICAB, María Cristina**

*Universidad Politécnica de Juventino Rosas*

Sistema mecatrónico emulador de movimientos de la ATM

**CORTÉS RAMÍREZ, Ulises & CASTAÑEDA ESPINOZA, Angélica**

*Universidad Tecnológica de Huejotzingo*

